CADRE TECHNOLOGIQUE DU SECTEUR CANADIEN DE L'AÉROSPATIALE ET DE LA DÉFENSE

101-01555/

Remerciements

Le cadre technologique résulte d'une initiative conjointe de Partenariat technologique Canada et d'Industrie Canada qui vise à favoriser et à soutenir le développement et l'application des technologies essentielles à la prospérité future du secteur de l'aérospatiale et de la défense.

Ce document, qui illustre la philosophie, les buts et les objectifs de ces deux organisations - qui consistent à renforcer l'industrie grâce à la collaboration - a été élaboré avec le concours de l'industrie et des intervenants du secteur de l'aérospatiale et de la défense. Partenariat technologique Canada et Industrie Canada souhaitent remercier ces collaborateurs pour leur participation à la préparation du document.

Les deux organisations désirent également remercier le consultant Bob Hastings de PointMan Canada Ltd., ainsi que les membres du comité directeur : Bob Atkinson, Lawrence Otupiri, Eugenie Prevost et Jamie Slattery.

Cette publication est également offerte par voie électronique sur le Web :

http://strategis.ic.gc.ca/cadretechaero

La présente publication est aussi offerte sur demande dans une présentation adaptée à des besoins particuliers.

Pour recevoir des exemplaires supplémentaires de ce rapport, veuillez vous adresser à :

La Direction générale de l'aérospatiale et automobile
Industrie Canada
235, rue Queen
Ottawa (Ontario) K1A 0H5

Courriel : aerotech@ic.gc.ca

Cette publication peut être reproduite par procédé électronique, photo-mécanique ou par quelque autre moyen, et entreposée dans un système d'extraction de données, sans autre autorisation que le présent avis.

Les opinions exprimées dans ce rapport ne sont pas nécessairement celles d'Industrie Canada ou du gouvernement du Canada.

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada (Industrie Canada) 2000
N° de catalogue C2-535/2000F
ISBN 0-662-85292-3
53280F

Also available in English under the title: *Canadian Aerospace and Defence Technology Framework*

Contient 30 p. 100 de fibres de post-consommation

Table des matières

1.0 Introduction 1
1.1 Objectif 1
1.2 Aperçu du document 1
2.0 Principes directeurs du cadre technologique 1
3.0 Importance de l'investissement dans la technologie 4
3.1 Importance de l'investissement de PTC 4
3.2 Spirale du développement technologique 5
4.0 Technologies essentielles du secteur canadien de l'aérospatiale et de la défense 6
4.1 Technologies essentielles 6
5.0 Technologies essentielles et descriptions connexes 9
5.1 Méthodes et pratiques industrielles de pointe 9
5.1.1 Normes et pratiques de qualité 9
5.1.2 Normes environnementales et procédés connexes 10
5.2 Technologies de conception et d'analyse 10
5.2.1 Conception et optimisation multidisciplinaires 11
5.2.2 Analyse, conception et optimisation des structures aéronautiques 11
5.2.3 Échange de données sur les produits et de données techniques ou informatisées 12
5.2.4 Conception technique et virtuelle simultanée 12
5.3 Avionique et électronique de pointe 13
5.3.1 Développement et intégration de systèmes d'avionique perfectionnés 13
5.3.2 Systèmes de commandes de vol 14
5.3.3 Technologies et concepts de cockpit perfectionnés 14
5.3.4 Technologies de surveillance des dommages de groupe moteur 15
5.4 Aérodynamique et mécanique du vol 16
5.4.1 Analyse, conception et validation du calcul de la dynamique des fluides – Aéronefs 16
5.4.2 Analyse et conception intégrées de profils aérodynamiques évolués 17
5.4.3 Intégration voilure, nacelle et propulsion 18
5.4.4 Aérodynamique et comportement des aéronefs perfectionnés 18
5.4.5 Mécanique du vol des giravions perfectionnés 19
5.4.6 Conception et développement d'aéronefs perfectionnés de l'aviation générale 19
5.4.7 Conception expérimentale et validation des performances 20
5.5 Technologies de propulsion aéronautique et des turbines à gaz 21
5.5.1 Élaboration et validation du calcul de la dynamique des fluides – Turbines à gaz 21

5.5.2 Conception de chambres de combustion de turbine à gaz perfectionnées 22
5.5.3 Techniques de conception efficaces aux plans énergétique et écologique 23
5.5.4 Analyse et optimisation de la conception des structures de turbines à gaz 23
5.5.5 Développement des matériaux à haute résistance à chaud 23
5.5.6 Rendement des matériaux à haute résistance à chaud et développement des revêtements 24
5.5.7 Conception et validation du contrôle numérique et électronique des circuits d'alimentation 25
5.5.8 Concepts d'intégration des composants 26
5.5.9 Contrôle de l'état et de l'usage du matériel 26
5.5.10 Conception de banc d'essai et méthodes d'évaluation des performances 27
5.6 Matériaux de structures d'aéronef 27
5.6.1 Développement de procédés de fabrication métallique 28
5.6.2 Développement de procédés de fabrication à l'aide de matériaux composites 28
5.6.3 Développement et vérification des caractères de systèmes à matériaux hybrides 29
5.6.4 Systèmes de revêtements et traitements des surfaces écologiques 29
5.6.5 Structures et matériaux intelligents 30
5.7 Systèmes aéronautiques 30
5.7.1 Conception de train d'atterrissage et intégration à la cellule 31
5.7.2 Conception et intégration de systèmes de conditionnement d'air 32
5.7.3 Développement de systèmes de commandes de vol perfectionnés 33
5.7.4 Développement de l'aéronef aux systèmes entièrement électriques 34
5.7.5 Développement des commandes de vol à fibres optiques 34
5.7.6 Mesures actives antibruit et antivibration 35
5.7.7 Systèmes de détection, de gestion et d'élimination de la glace 35
5.8 Simulation et modélisation 36
5.8.1 Simulation et modélisation pour l'acquisition (mission), les exercices et la formation (SMART) 37
5.8.2 Génération d'images 37
5.8.3 Technologies de visualisation, y compris les casques à fibres optiques, la projection micro-laser et les panneaux plats 38
5.8.4 Environnements et concepts perfectionnés de formation en simulation 39
5.8.5 Outils de base de données 40
5.9 Technologies de fabrication de pointe 40
5.9.1 Technologies de l'information pour les procédés de fabrication 41
5.9.2 Techniques de coulée 42

5.9.3 Métallurgie des poudres 43
5.9.4 Assemblage de tous les types de métaux 43
5.9.5 Systèmes et procédés de revêtement 44
5.9.6 Techniques de fabrication au laser 46
5.9.7 Matériaux composites à fibres 47
5.9.8 Usinage ultrarapide 47
5.9.9 Formage avancé des métaux 48
5.9.10 Formage près de la cote désirée 49
5.9.11 Contrôle des procédés intelligents 49
5.9.12 Composites à matrice métallique 49
5.9.13 Composites à matrice céramique 50
5.10 Technologies d'entretien, de réparation et de révision 50
5.10.1 Technologies de réparation des turbines à gaz 50
5.10.2 Évaluation non destructive des matériaux de pointe 51
5.10.3 Systèmes de contrôle de l'état et de l'usage du matériel 52
5.10.4 Réparation des systèmes métalliques 53
5.10.5 Réparation des systèmes composites 53
5.11 Systèmes spatiaux et communications 54
5.11.1 Systèmes intelligents pour les structures spatiales 54
5.11.2 Télécommunications par satellite 54
5.11.3 Observation de la Terre 54
5.11.4 Surveillance de l'espace 55
5.11.5 Sources d'énergie électrochimiques 55
Sigles, acronymes et symboles 57

ANNEXE A GUIDE DE PRÉSENTATION DES PROPOSITIONS

1.0 Introduction

1.1 Objectif

Le présent document vise à renseigner tous les intervenants de Partenariat technologique Canada (PTC) sur les facteurs dont il faut tenir compte pour l'élaboration, la présentation et l'évaluation des projets proposés dans le cadre du programme de PTC. À cette fin, il faut définir les étapes technologiques et les technologies jugées importantes pour l'évolution continue du secteur canadien de l'aérospatiale et de la défense et pour l'atteinte des objectifs stratégiques nationaux du Canada.

1.2 Aperçu du document

Le document est structuré de la façon suivante :

- Le cycle de développement technologique est défini et la terminologie de chacune des étapes est présentée – cette définition s'impose pour clarifier les étapes où les efforts de PTC doivent être plus soutenus. Les étapes du développement technologique reposent sur les principes et les concepts établis et reconnus issus de sources canadiennes et des principaux partenaires commerciaux du Canada.
- Les technologies jugées d'importance stratégique pour la réussite du secteur canadien de l'aérospatiale sont ensuite répertoriées et résumées. Onze créneaux technologiques essentiels sont définis, de même que les technologies stratégiques connexes et leurs caractéristiques. Ces créneaux technologiques de premier plan et ces technologies essentielles se fondent sur les domaines technologiques déjà définis par PTC, ainsi que sur les données tirées de la Carte routière technologique pour la conception, la fabrication, la réparation et la révision des aéronefs (projet pilote de l'Ontario) – ce document est cité comme la Carte routière technologique CFRR dans le corps du texte.
- L'annexe A du document contient les définitions de chacune des technologies stratégiques recensées, ainsi que des observations pertinentes, le cas échéant, sur des propositions intéressantes présentées dans le cadre du programme de PTC.

2.0 Principes directeurs du cadre technologique

Trois grands principes directeurs ont guidé l'élaboration du document.

- Le cadre technologique et les définitions afférentes doivent être de nature exhaustive et corroborer les classifications canadiennes et américaines correspondantes en vigueur.
- Le cadre technologique doit traiter des besoins précis et des caractéristiques particulières du secteur canadien de la défense et de l'aérospatiale.
- Le cadre technologique doit s'inspirer des définitions des technologies de PTC et de la Carte routière technologique CFRR et les refléter.

Tableau 1A – Cadre technologique de PTC – Étapes et définitions du développement technologique

Étape technologique	Sous-étape	Définition	Caractéristiques et exemples	Remarques sur l'admissibilité
Développement technologique horizontal – Recherche fondamentale	Commanditée par une université ou un autre organisme sans but lucratif	Travail de nature expérimentale ou théorique amorcé surtout pour acquérir de nouvelles connaissances sur les fondements sous-jacents d'un phénomène et les faits observables, sans considération particulière à l'égard de son application ou de son utilisation.	La recherche fondamentale porte sur la formulation et la mise à l'épreuve d'hypothèses, de théories ou de lois, créant ainsi le fondement d'une recherche appliquée future. En règle générale, les fruits de la recherche fondamentale ne se prêtent pas à la mise en marché. La modélisation en laboratoire peut être utilisée aux seules fins de démonstration d'un concept ou d'un procédé; il n'y aura habituellement aucune ressemblance à une pièce d'équipement fonctionnelle.	Généralement non admissible.
	Commanditée par une société commerciale canadienne			Généralement admissible.
	Recherche appliquée	Première étude visant à acquérir de nouvelles connaissances, surtout pour atteindre un objectif ou un but pratique précis.	La recherche appliquée réalisée vise à établir de nouvelles méthodes ou façons d'atteindre des objectifs précis et préétablis. En règle générale, la recherche appliquée vise à montrer et à illustrer que des connaissances ou des principes scientifiques peuvent donner lieu à une application concrète. La recherche appliquée peut faire intervenir un modèle de développement expérimental pour l'illustration d'un concept ou d'un procédé.	En règle générale, la recherche appliquée ne vise pas la mise au point d'un produit particulier et s'accompagnera de risques moyens à élevés. C'est à ce titre que l'aide financière gouvernementale peut sans doute offrir le plus d'encouragement au secteur.
	Recherche sur la technologie des composants	Recherche appliquée visant un élément de conception susceptible d'avoir une application étendue, mais pouvant également se rapporter à un produit ou à un procédé donné.	Le calcul de la dynamique des fluides dans la chambre de combustion serait un exemple de ce type de recherche; il viserait alors la définition de paramètres d'application précis pour la chambre de combustion d'une turbine à gaz; par contre, ce travail de conception pourrait s'appliquer à tous les types de turbine à gaz.	Admissible, à la condition de pouvoir établir que la technologie élaborée ne se rapporte pas à un seul produit ou type de produit.
	Acquisition de compétences importantes	Vise l'acquisition d'une capacité technologique; même si elle n'est pas unique dans l'ensemble, cette capacité est cependant une compétence stratégique dont le Canada a besoin.	L'étude sur les fournisseurs de base et les préoccupations en matière d'intégration des systèmes illustrent parfaitement ce cas. Il ne s'agit déjà plus de recherche scientifique fondamentale, mais il a été établi que l'intégration des systèmes de second rang est une compétence stratégique dont le Canada doit se doter. Le financement des compétences voulues pour acquérir une capacité en intégration des systèmes serait envisagé.	Activité admissible si elle se rattache aux besoins de développement stratégique du Canada.

Tableau 1B – Cadre technologique de PTC – Étapes et définitions du développement technologique

Étape technologique	Sous-étape	Définition	Caractéristiques et exemples	Remarques sur l'admissibilité
Développement technologique vertical	Démonstration et démonstrateur de technologie de pointe	Vise l'évaluation et la démonstration d'une technologie dans un contexte de service réaliste, dans le but d'évaluer les possibilités de rendement ou la faisabilité technique d'une technologie de pointe.	Il s'agit d'un mécanisme pour évaluer et présenter de manière économique de nouvelles technologies. La démonstration d'une technologie de pointe fait normalement intervenir un dispositif de modélisation évolué pour explorer les solutions possibles en termes de conception, établir le rendement ou la durabilité d'un élément ou encore, illustrer le degré d'achèvement ou la faisabilité d'un concept technologique. Un modèle de développement perfectionné peut servir àillustrer un concept ou un procédé, ainsi que la faisabilité technique. Le cas échéant, la conception du modèle devra souvent permettre la démonstration du concept ou du procédé dans des conditions réalistes ou pertinentes.	L'admissibilité dépendra de la distinction qu'il sera possible d'établir entre les objectifs de démonstration de la technologie et le développement d'un produit précis.
	Développement technologique visant un produit précis	Vise l'évaluation de technologies associées au développement ou àla démonstration d'un produit ou d'un composant précis.	Développement technologique àla dernière étape du cycle de conception technique et clairement associé àun produit ou àun service particulier. Porte souvent sur un certain nombre de modèles de préproduction ou de prototypes dont la mise à l'épreuve se déroule dans des conditions de service presque réelles pendant une longue période d'essai; il peut aussi s'agir d'autres essais imposés par un organisme de réglementation.	Généralement non admissible.
	Technologie de fabrication de pointe	Tous les efforts visant l'introduction ou le raffinement d'une conception, d'un procédé ou d'une technique de fabrication, dans le but de réduire les coûts associés àla conception, àla fabrication ou àla durée de vie utile d'un produit, ou encore d'améliorer l'efficacité des procédés de fabrication.	Ce volet se rapporte àde larges secteurs d'application de la technologie; il peut s'agir de l'élaboration de procédés et de divers procédés d'amélioration de la fiabilité et des possibilités d'entretien.	L'admissibilité dépend du lien entre les objectifs de la proposition et les objectifs prioritaires en matière de développement technologique stratégique du Canada.
Mise au point technique	Développement de la production et des produits	Tous les efforts se rapportant àla production d'un composant ou d'un produit particulier et faisant intervenir des méthodes industrielles établies.	Développement technologique visant un produit précis.	Généralement non admissible.

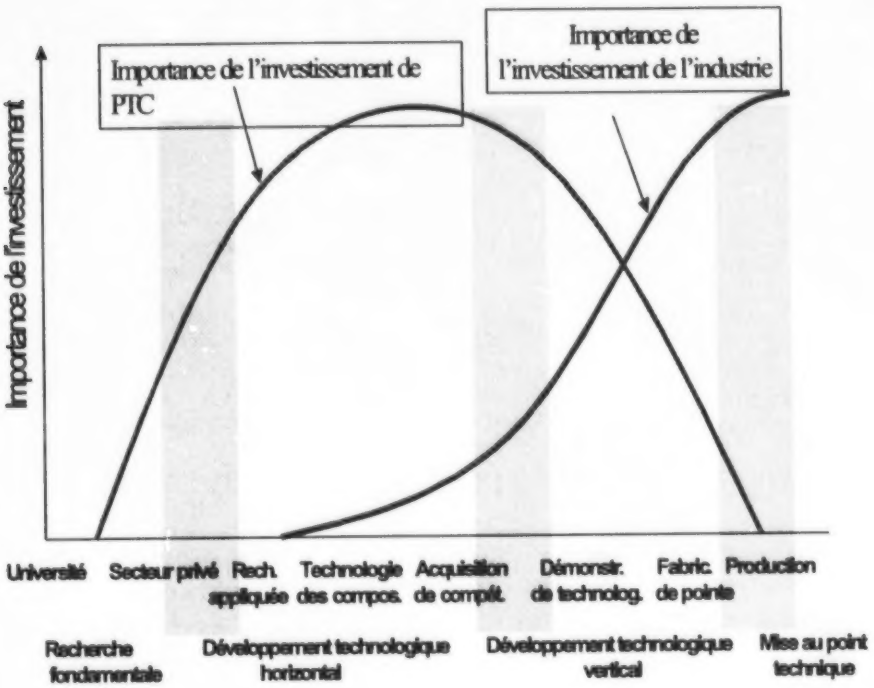

Figure 1. Importance de l'investissement de PTC et de l'industrie

3.0 Importance d'investir dans la technologie

3.1 Importance de l'investissement de PTC

La figure 1 décrit l'importance générale accordée à l'investissement de PTC àchaque étape technologique. Elle illustre également l'importance accordée par l'industrie aux technologies, selon chacune des étapes. L'importance de l'investissement de PTC se fonde sur l'observation voulant qu'au tout début de la mise au point, et bien avant la commercialisation, il y a moins d'intérêt de la part de l'industrie, donc moins d'investissement. Dans ce contexte, l'investissement de PTC dans les technologies s'inscrit davantage dans une perspective stratégique et peut servir àencourager les efforts de collaboration à long terme de PTC dans le développement technologique. À cette étape du développement technologique, l'investissement ne vise pas un produit en particulier, car il est plutôt de nature stratégique.

3.2 Spirale du développement technologique

La figure 1 illustre une évolution unidimensionnelle de la technologie. Il est par ailleurs reconnu que d'autres facteurs entrent en ligne de compte dans l'établissement d'une assise technologique. La même étape de développement technologique peut être reprise sur la ligne de production d'une entreprise ou au cours de la vie d'un produit donné, ou encore en raison de l'évolution technologique. La figure 2 ci-après décrit ce contexte d'évolution constante.

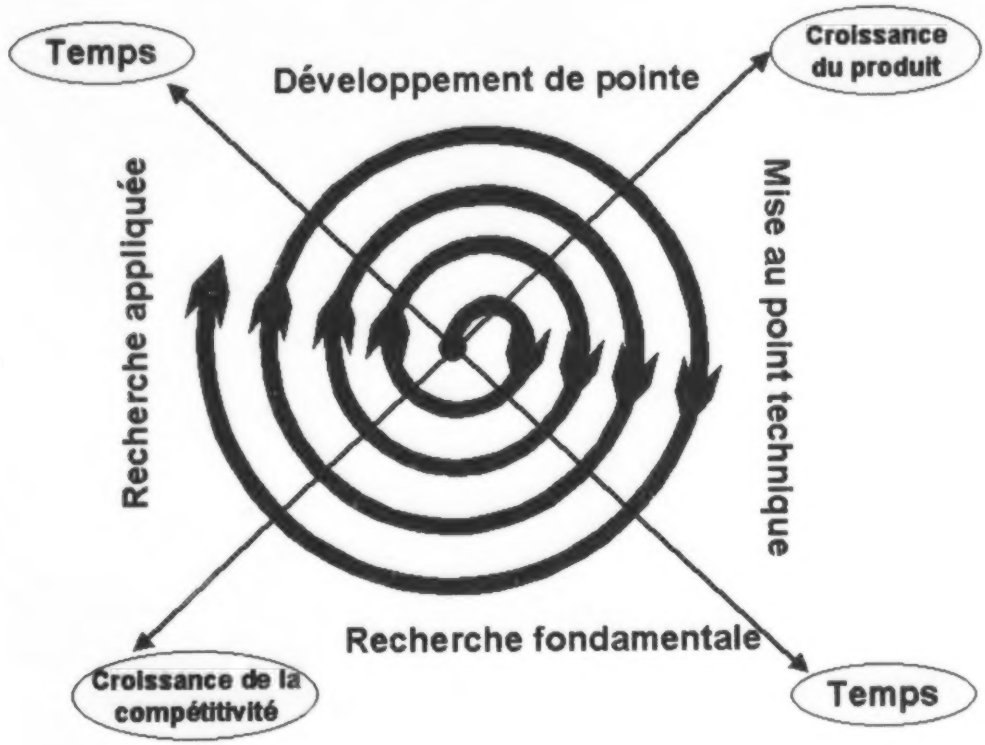

Figure 2. La spirale du développement technologique

4.0 Technologies essentielles du secteur canadien de l'aérospatiale et de la défense

4.1 Technologies essentielles

Onze technologies essentielles comprenant les volets de la discipline, du segment et des procédés ont été définies pour le secteur canadien de l'aérospatiale et de la défense. Voici la liste de ces technologies, qui sont également reprises à la figure 3 qui suit.

- Les méthodes et les pratiques industrielles de pointe
- Les technologies de conception et d'analyse
- L'avionique et l'électronique de pointe
- L'aérodynamique et la mécanique du vol
- Les technologies de la propulsion aéronautique et des turbines à gaz
- Les matériaux de structures d'aéronef et les procédés de fabrication connexes
- Les systèmes aéronautiques
- La simulation et la modélisation
- Les technologies de fabrication de pointe
- Les technologies d'entretien, de réparation et de révision
- Les systèmes spatiaux et les communications spatiales

Le tableau 2 ci-après établit une corrélation entre les technologies essentielles relevées dans le cadre technologique de PTC et les domaines techniques définis dans la Carte routière technologique CFRR.

Tableau 2. Corrélation entre les technologies essentielles du cadre technologique de PTC et les domaines techniques d'importance de la Carte routière technologique CFRR

Technologies essentielles du cadre technologique de PTC	Carte routière technologique CFRR (projet pilote de l'Ontario)
Méthodes et pratiques industrielles de pointe	Technologies de conception Technologies de gestion
Technologies de conception et d'analyse	
Avionique et électronique de pointe	Technologies des systèmes
Aérodynamique et mécanique du vol	Technologies de conception
Technologies de la propulsion aéronautique et des turbines à gaz	Technologies environnementales
Matériaux de structures d'aéronef et procédés de fabrication connexes	Technologies des matériaux et des structures Technologies environnementales
Systèmes aéronautiques	Technologies des systèmes
Simulation et modélisation	Technologies de visualisation
Technologies de fabrication de pointe	Technologies de fabrication
Technologies d'entretien, de réparation et de révision	Technologies d'entretien, de réparation et de révision
Systèmes spatiaux et communications spatiales	Technologies environnementales

5.1 Méthodes et pratiques industrielles de pointe	**5.4 Aérodynamique et mécanique du vol**	**5.6 Matériaux de structures d'aéronef et procédés de fabrication connexes**	**5.8 Simulation et modélisation**	**5.10 Technologies d'entretien, de réparation et de révision**
5.1.1 Normes et pratiques de qualité 5.1.2 Normes environnementales et procédés connexes	5.4.1 Analyse, conception et validation du calcul de la dynamique des fluides – Aéronefs 5.4.2 Analyse et conception intégrées de profils aérodynamiques évolués 5.4.3 Intégration voilure, nacelle et propulsion 5.4.4 Aérodynamique et comportement des aéronefs perfectionnés 5.4.5 Mécanique du vol des giravions perfectionnés 5.4.6 Conception et développement d'aéronefs perfectionnés de l'aviation générale 5.4.7 Conception expérimentale et validation des performances	5.6.1 Développement de procédés de fabrication métallique 5.6.2 Développement de procédés de fabrication à l'aide de matériaux composites 5.6.3 Développement et vérification des caractères de systèmes à matériaux hybrides 5.6.4 Systèmes de revêtements et traitements des surfaces écologiques 5.6.5 Structures et matériaux intelligents	5.8.1 Simulation et modélisation pour l'acquisition (mission), les exercices et la formation (SMART) 5.8.2 Génération d'images 5.8.3 Technologies de visualisation, y compris les casques à fibres optiques, la projection micro-laser et les panneaux plats 5.8.4 Environnements et concepts perfectionnés de formation en simulation 5.8.5 Outils de base de données	5.10.1 Technologies de réparation des turbines à gaz 5.10.2 Évaluation non destructive des matériaux de pointe 5.10.3 Systèmes de surveillance de l'état et de l'usage du matériel 5.10.4 Réparation des systèmes métalliques 5.10.5 Réparation des systèmes composites 5.10.6 Modifications des revêtements et des surfaces aux fins d'une réparation
5.2 Technologies de conception et d'analyse	**5.5 Technologies de la propulsion aéronautique et des turbines à gaz**	**5.7 Systèmes aéronautiques**	**5.9 Technologies de fabrication de pointe**	**5.11 Systèmes spatiaux et communications spatiales**
5.2.1 Conception et optimisation multidisciplinaires 5.2.2 Analyse, conception et optimisation des structures aéronautiques 5.2.3 Échange de données sur les produits et de données techniques ou informatisées 5.2.4 Conception technique et virtuelle simultanée	5.5.1 Élaboration et validation du calcul de la dynamique des fluides – Turbines à gaz 5.5.2 Conception de chambres de combustion de turbine à gaz perfectionnées 5.5.3 Techniques de conception efficaces aux plans énergétique et écologique 5.5.4 Analyse et optimisation de la conception des structures de turbines à gaz 5.5.5 Développement des matériaux à haute résistance à chaud 5.5.6 Rendement des matériaux à haute résistance à chaud et développement des	5.7.1 Conception de train d'atterrissage et intégration à la cellule 5.7.2 Conception et intégration de systèmes de conditionnement d'air 5.7.3 Développement de systèmes de commandes de vol perfectionnés 5.7.4 Développement de l'aéronef aux systèmes entièrement électriques 5.7.5 Développement des commandes de vol à fibres optiques 5.7.6 Mesures actives antibruit et antivibration 5.7.7 Systèmes de détection,	5.9.1 Technologies informatiques pour les procédés de fabrication 5.9.2 Techniques de coulée 5.9.3 Métallurgie des poudres 5.9.4 Assemblage de tous les types de métaux 5.9.5 Systèmes et procédés de revêtement 5.9.6 Techniques de fabrication au laser 5.9.7 Matériaux composites à fibres 5.9.8 Usinage ultrarapide 5.9.9 Formage avancé des métaux 5.9.10 Formage près de la cote désirée	5.11.1 Systèmes intelligents pour les structures spatiales 5.11.2 Télécommunications par satellite 5.11.3 Observation de la Terre 5.11.4 Surveillance de l'espace 5.11.5 Sources d'énergie électrochimiques

	revêtements 5.5.7 Conception et validation du contrôle numérique et électronique des circuits d'alimentation 5.5.8 Concepts d'intégration des composants 5.5.9 Contrôle de l'état et de l'usage du matériel 5.5.10 Conception de banc d'essai et méthodes d'évaluation des performances	de gestion et d'élimination de la glace	5.9.11 Contrôle des procédés intelligents 5.9.12 Composites àmatrice métallique 5.9.13 Composites àmatrice céramique	
5.3 Avionique et électronique de pointe				
5.3.1 Développement et intégration de systèmes d'avionique perfectionnés 5.3.2 Systèmes de commandes de vol 5.3.3 Technologies et concepts de cockpit perfectionnés 5.3.4 Technologies de surveillance des dommages de groupe moteur				

Figure 3 – Cadre technologique de PTC

5.0 Technologies essentielles et descriptions connexes

On trouvera ci-après de brèves descriptions de chaque technologie essentielle, ainsi que de chacun des éléments technologiques connexes.

5. 1 Méthodes et pratiques industrielles de pointe

La technologie essentielle des méthodes et pratiques industrielles de pointe se rapporte àdes objectifs qui ne touchent pas une technologie précise, mais qui jouent tout de même un rôle important et qui ont de très vastes répercussions sur l'expansion de l'assise industrielle du secteur canadien de l'aérospatiale et de la défense. Un investissement est consenti dans les projets qui visent la mise en place de nouveaux procédés ou de nouvelles pratiques permettant d'améliorer la qualité et la productivité des fabricants canadiens ainsi que celles du personnel de l'industrie.

Les éléments de la technologie essentielle de la conception sont décrits ci-après.

5.1.1 Normes et pratiques de qualité

La qualité est un facteur dont l'importance ne fait plus aucun doute, mais qui est souvent passée sous silence ou qui ne reçoit pas autant d'attention lorsque des problèmes surgissent, c'est-à-dire au moment précis où la qualité devrait demeurer la première préoccupation. Le concept de qualité fait intervenir un certain nombre de principes philosophiques anciens et nouveaux, qui n'ont rien perdu de leur pertinence encore aujourd'hui. Ainsi, le concept japonais Kaizen, qui signifie à la fois progrès continu et innovation, a été intégré dans les procédés qui encouragent la réflexion continue et efficace, le questionnement et l'amélioration des fonctions au sein de l'entreprise. Le contrôle de la qualité totale et ses diverses variantes permettent subséquemment de donner suite àcette réflexion. Si la qualité est une préoccupation constante, le client obtiendra la meilleure valeur possible et utilisera le produit. Les bénéfices seront optimisés car un revenu accru sera l'objectif visé. De même, si la conception est réalisée àun coût minime, il s'ensuivra une marge bénéficiaire plus grande.

Pour atteindre ces objectifs, il faut mettre au point des outils qui confèreront un avantage concurrentiel en matière de conception fondée sur la qualité et les coûts. L'emploi des sept outils anciens améliore l'application du contrôle statistique du processus, lequel sert à mesurer la qualité du produit. Par définition, ces mesures sont des substituts à l'assurance de la qualité visant un produit donné. Le concept de la qualité établit un lien entre la valeur telle que l'entend le client et les processus qui interviennent dans la fabrication, le maintien et le retrait du produit. Des critères de qualité sont attribués àdivers aspects du produit, ainsi qu'au processus qui a donné naissance au produit. Les méthodes qui s'inspirent de la technique Taguchi, la méthode de surface de réaction, ou l'optimisation multidisciplinaire sont ensuite employées pour optimiser la valeur du produit auprès du client. La conception fondée sur la qualité est une stratégie simple, efficace, efficiente et élégante. (E.B. Dean)

Le modèle Sigma six est un principe de conception qui provient à l'origine de Motorola et il est de plus en plus utilisé dans le secteur canadien de l'aérospatiale. Ce modèle met d'abord l'accent sur la satisfaction du client, dans la mesure où le fournisseur doit véritablement

comprendre ce que désire obtenir le client, en plus de ce qu'il demande effectivement. Si le client est mécontent du produit, alors il y a une lacune dans la communication, même si le client a reçu exactement ce qui avait été précisé au départ. Le fournisseur doit connaître les procédés et les matériaux qui serviront àsatisfaire le client, aussi bien à l'interne que d ans toute la chaîne de l'approvisionnement. Cette connaissance ou cette compréhension doit porter sur des facteurs comme les écarts de fabrication en raison de l'usure de machines et les tolérances caractéristiques des matériaux. Grâce àcette connaissance, il est possible d'adopter une conception rigoureuse et de l'appliquer à la création d'un produit qui comblera toutes les attentes du client, aussi bien au moment de la livraison que pendant sa durée de vie utile. Le modèle Sigma six exige l'élaboration d'outils qui se rapporteront souvent àdes conditions de conception et de production particulières.

5.1.2 Normes environnementales et procédés connexes

Les normes et les procédés en matière d'environnement porteront principalement sur l'incorporation des procédés écologiques mis de l'avant par la série de normes ISO 14000 pour le secteur de l'aérospatiale et de la défense. Cette série de normes en gestion environnementale a été produite par l'Organisation internationale de normalisation (ISO).

Les normes ISO 14000 visent à offrir un cadre reconnu au plan international pour la gestion, la mesure, l'évaluation et la vérification environnementales. Elles mettent à la disposition des organisations des outils pour évaluer et régir les retombées environnementales de leurs activités, de leurs produits ou de leurs services. Les normes sont conçues avec une certaine souplesse, de façon àen permettre l'utilisation par des organisations de toute dimension et de tout domaine d'activité. Elles traitent des sujets suivants :

- les systèmes de gestion environnementale;
- la vérification environnementale;
- les appellations et les déclarations environnementales;
- l'évaluation du rendement environnemental; et
- l'évaluation du cycle de vie.

Ces technologies ne se rapporteront pas àun produit précis et pourront s'appliquer à la gamme complète des procédés de fabrication du secteur canadien de l'aérospatiale et de la défense.

5.2 Technologies de conception et d'analyse

Les technologies essentielles dans le domaine de la conception et de l'analyse comprennent les technologies ou les procédés qui touchent à l'ensemble du secteur de l'aérospatiale et de la défense. Dans de nombreux cas, les descripteurs technologiques de nature plus générale regroupés sous la rubrique de la conception et de l'analyse sont approfondis ailleurs dans des technologies ou des procédés caractéristiques d'une discipline, d'un segment ou d'un sous-domaine distinct d'autres technologies essentielles. Ce serait le cas, par exemple, de la modélisation et de la conception analytiques de pointe, qui fait intervenir la technologie des outils informatiques de la conception assistée par ordinateur. Ainsi, le calcul de la dynamique des fluides est un outil de modélisation et de conception analytique perfectionné, dont des variantes plus spécialisées sont abordées sous la rubrique des technologies relatives à l'aérodynamique et à la mécanique du vol, à la propulsion aéronautique et aux turbines àgaz.

Les différents volets technologiques de la technologie essentielle de la conception et de l'analyse sont décrits ci-après.

5.2.1 Conception et optimisation multidisciplinaires

Comme son nom l'indique, la conception et l'optimisation multidisciplinaires traite de l'emploi simultanée d'une série complète d'outils de conception par ordinateur qui servent à produire la meilleure conception qui soit. Il s'agit en règle générale d'un processus répétitif et chacune des étapes de conception d'un aéronef fait habituellement très largement appel aux outils informatiques. Lorsqu'il s'agit d'un aéronef, la conception et l'optimisation multidisciplinaires pourraient mettre à contribution des outils d'ingénierie assistée par ordinateur (IAO) pour des sous-domaines comme l'aérodynamique, les structures et les systèmes aéronautiques. Les hypothèses de départ de la conception seraient incorporées dans chaque ensemble d'outils IAO, de même que les limites et les paramètres à optimiser. Chaque ensemble supplémentaire IAO servirait ensuite à calculer les paramètres de conception qui seraient utilisés ultérieurement par d'autres outils IAO, ces paramètres devenant alors un sous-ensemble de données de saisie exigées au départ. La conception finale serait en théorie beaucoup plus solide au plan structural, plus légère et plus économique à réaliser. Le calendrier de conception serait par ailleurs passablement écourté. Les difficultés que pose ce processus se situent dans l'échange des données entre les diverses applications IAO, et en ce qui concerne l'arrimage de tout le processus de conception dans une optique de convergence vers une solution finale efficiente.

5.2.2 Analyse, conception et optimisation des structures aéronautiques

L'optimisation des outils de conception analytique est une activité qui réduira au bout du compte le temps consacré au travail de conception. Elle produira une conception plus légère et efficiente, tout en réduisant les coûts de production et du cycle de vie du produit final. Les nombreux outils analytiques maintenant offerts sur le marché ont généralement été conçus pour des applications précises. Bien souvent, ils ne se prêtent pas directement à un domaine de conception autre que celui auquel ils s'adressaient à l'origine. Par exemple, le calcul de la dynamique des fluides qui sert à calculer le circuit d'écoulement fortement compressible d'une turbine à gaz différera dans une très large mesure des calculs opérés par un logiciel en dynamique des fluides pour l'analyse de la voilure d'un aéronef à faible vitesse. De même, l'analyse structurale de matériaux métalliques pour laquelle des outils ont été développés aura des applications très différentes de celles conçues pour les matériaux composites, dont les propriétés varient en fonction de l'axe.

La capacité de définir rapidement une structure d'aéronef qui allie légèreté et tolérance améliorée à la fatigue et aux dommages constitue en soi une technologie essentielle pour que les avionneurs canadiens se maintiennent en tête de file des concepteurs des nouveaux aéronefs de l'avenir. Cet objectif sera atteint grâce à l'utilisation massive de techniques informatiques d'optimisation de l'analyse et de la conception des structures, ainsi que de l'analyse des défaillances et de la mécanique des ruptures. Ces méthodes doivent pouvoir s'intégrer aux bases de données de conception et de fabrication et aux systèmes CAO/FAO 3-D internes, tout en étant faciles d'utilisation. Les fournisseurs et les partenaires auront accès aux données de conception produites grâce à l'échange de données informatisées (EDI). Ce partage d'information garantira l'uniformité des connaissances sur les exigences en matière de charges utiles et d'interface, ainsi que les enveloppes d'espace offerte pour leurs produits. La diffusion immédiate parmi les fournisseurs de l'information sur des

modifications apportées à la conception aidera àdiminuer les activités subséquentes de nouvelle conception, le retard et les coûts supplémentaires découlant d'un réusinage.

La conception préliminaire des structures fera appel àune méthode approfondie d'analyse des éléments finis, ainsi qu'àune optimisation limitée. Le système doit être par ailleurs fortement automatisé, de manière àpermettre la création rapide d'un maillage de modélisation par analyse des éléments finis. Pour réduire le temps consacré à la conception, les exigences en matière de charges et de rigidité dynamique doivent être communiquées beaucoup plus rapidement que ce n'est actuellement le cas. Pour ce faire, il faudra élaborer très tôt des modèles de conception et d'optimisation multidisciplinaires pour l'optimisation générale de l'aérodynamique et des structures qui serviront àdéfinir les charges statiques et dynamiques pour l'exploitation en vol et au sol. Les études comparatives doivent permettre la recherche rapide de la meilleure conception et produire des dimensions de structures réalistes en vue d'établir les enveloppes d'espace et les poids exacts de chaque composant de façon à minimiser le travail de conception àreprendre ultérieurement.

5.2.3 Échange de données sur les produits et de données techniques ou informatisées

L'échange de données sur les produits, de données techniques ou informatisées est un élément important de la conception en collaboration, laquelle renvoie au développement de produits ou de procédés entièrement intégrés. Cet échange de données fait intervenir un lien électronique entre chaque maillon de la chaîne de l'approvisionnement, de manière àformer un processus consolidé et simultané de conception où le maître d'œuvre, les fournisseurs et souvent les clients eux-mêmes sont mis àcontribution dans un contexte d'élaboration et d'acceptation rapide de la conception (technique du tableau blanc, courriel, téléphonie informatisée et échange de dessins). L'élimination du papier dans le processus accélère de façon radicale la conception et réduit substantiellement les coûts. Le défi que doit relever le secteur de l'aérospatiale tient à l'échange électronique de fichiers de logiciels de dessin (ingénierie, conception et fabrication assistées par ordinateur). En effet, ces fichiers sont d'une rare complexité et aux fins de la conformité réglementaire, ils doivent être exacts àtous égards ou presque. Les projets de démonstration de technologie qui explorent l'échange de données sur un produit sont toujours en demande, tout comme les projets en recherche et développement sur les besoins en matière de largeur de bande et les protocoles d'échange.

5.2.4 Conception technique et virtuelle simultanée

Winner, Pennell, Bertrand et Slusarezuk (1988) ont défini la conception technique simultanée comme « une approche systémique de la conception intégrée et simultanée des produits et des procédés connexes, y compris les activités de fabrication et de soutien. Cette technique vise à faire àsorte que les concepteurs puissent tenir compte dès le départ de tous les éléments du cycle de vie d'un produit, de la conception àsa mise au rancart, ce qui s'entend également des considérations sur la qualité, le coût, le calendrier et les besoins des utilisateurs ».

Jagannathan, V., K. J. Cleetus, R. Kannan, A. S. Matsumoto et J. W. Lewis (1991) ont défini pour leur part la conception technique simultanée comme « le processus qui consiste àformer et àsoutenir des équipes multifonctionnelles qui établissent très tôt dans le cycle de la conception les paramètres de produit et de procédé ». Selon Dean et Unal (1992), « la conception technique simultanée vise àréunir au bon moment les gens compétents, dans le but de circonscrire et de régler des problèmes de conception. Elle fait intervenir des

considérations sur l'assemblage, la disponibilité des éléments, le coût, la satisfaction du client, les possibilités d'entretien, de gestion, de fabrication et de service du produit ou du procédé, son rendement, les risques, la sécurité, le calendrier, son acceptation par le public, ainsi que sur tous les autres attributs du produit ».

En bout de ligne, la conception virtuelle signifie essentiellement qu'aucun prototype ou banc d'essai particulier n'est exigé avant la sortie des unités de la chaîne de production. Il s'agit d'une conception entièrement électronique, d'une méthode d'analyse et de certification qui entraînerait un cycle de conception très écourté et une réduction substantielle des ressources matérielles et en matériaux. En outre, c'est une technique de développement plus écologique. Tous ces facteurs permettent de réduire considérablement les coûts. À l'heure actuelle, ce concept n'offre pas beaucoup de possibilités d'application, du moins pas avant l'année 2015. Du reste, la conception virtuelle est en butte àd'autres obstacles, car le secteur de l'aérospatiale est fortement réglementé; il s'agit d'un domaine où la mise à l'essai du matériel présente peu de valeur véritable au plan de la sécurité mais fait littéralement partie des mœurs. Les technologies habi litantes dont le secteur a besoin sont l'informatique, notamment en ce qui a trait au transfert de données et à la modélisation informatique, l'élaboration d'outils d'analyse des calculs, ainsi que la validation expérimentale des outils de conception et d'analyse.

5.3 Avionique et électronique de pointe

Les systèmes d'avionique comprennent les systèmes aéronautiques comme les instruments électroniques de vol, les systèmes de navigation, les systèmes de communication, le système de commandes de vol automatisées et le système de navigation par inertie. La plupart de ces systèmes sont commandés par ordinateur et s'accompagnent dans une large mesure de logiciels ou de micrologiciels connexes. L'avionique et l'électronique constituent une partie appréciable des coûts d'acquisition et du poids d'un aéronef. Pour un aéronef militaire, ces systèmes peuvent représenter jusqu'à40 p. 100 du coût et du poids de l'appareil. En outre, les systèmes d'avionique de pointe offrent la possibilité de réduire la charge de travail du personnel navigant et d'améliorer la sécurité des vols. Le développement de systèmes d'avionique abordables et fortement intégrés pour les aéronefs demeure une exigence importante. Il faut également développer de plus en plus des systèmes àconcepti on modulaire et insensibles aux défaillances dans le but de réduire les coûts, le poids et les besoins en énergie. Ces systèmes doivent néanmoins permettre de satisfaire rapidement les attentes des clients et de leur fournir des produits fiables et adaptés.

Les volets technologiques regroupés dans la technologie essentielle de l'avionique et de l'électronique de pointe sont décrits ci-après.

5.3.1 Développement et intégration de systèmes d'avionique perfectionnés

Les systèmes d'avionique traditionnels comprennent la gestion de vol, les communications, la navigation, le radar, les instruments météorologiques, les techniques d'affichage dans le cockpit, les aides à l'atterrissage, les systèmes de surveillance du trafic et d'évitement des collisions, etc. Les systèmes d'avionique militaire spécialisés comprennent des systèmes de reconnaissance, de guerre électronique et de gestion de l'armement.

L'avionique intégrée renvoie aux systèmes d'avionique qui exécutent de nombreuses fonctions ou contribuent à l'exécution de multiples fonctions d'un aéronef. Un objectif qui

revient souvent dans l'avionique intégrée tient aux efforts visant l'utilisation de modules électroniques ou de composants communs. Les exemples les plus courants de cette technologie sont l'ordinateur monocarte multifonctions et la carte d'unité centrale standard.

Le développement de la technologie d'avionique perfectionnée portera surtout sur la mise au point de modules multifonctions tolérant aux défaillances, susceptibles d'être intégrés rapidement aux nouveaux systèmes aéronautiques ou aux systèmes en service. Pour réussir, les fabricants devront avoir les compétences voulues en intégration de systèmes de cockpit complets et en gestion de leur installation.

5.3.2 Systèmes de commandes de vol

Le système de commandes de vol d'un aéronef comprend tous les éléments qui permettent au pilote – humain ou automatique – de manœuvrer l'appareil. Les éléments de base en sont les commandes ou le manche àbalai, les palonniers et les gouvernes (dérive, ailerons, gouvernail de profondeur, élevons, déporteurs, etc.). En ce qui concerne les giravions, il y a aussi le levier de collectif et les pales de rotor. Selon la complexité de l'aéronef, ces éléments peuvent être reliés aux commandes de vol par câble et tiges poussoirs et munis de poulies et de renvois, et les gouvernes peuvent être actionnées à l'aide de câbles et de tiges directement, ou par l'entremise d'actionneurs hydrauliques commandés mécaniquement ou par d'autres connexions électriques, ou par un système hybride. Encore là, sur les aéronefs plus complexes, le système de commandes de vol peut faire intervenir un ordinateur alimenté par des signaux issus de divers détecteurs, ce qui confère à l'appareil une plus grande stabilité et une meilleure manœuvrabilité.

Ce qui intéresse tout particulièrement le secteur canadien de l'aéronautique, c'est le développement de systèmes de commandes de vol électriques et de commandes actives pour les aéronefs ayant une capacité de 120 passagers ou moins. Les commandes de vol électriques remplacent les commandes mécaniques et l'actionnement des commandes se fait au moyen de signaux électriques. On prévoit l'installation de commandes de vol àfibres optiques (voir plus loin dans la présente rubrique). Les commandes de vol actives font intervenir une interprétation informatique de l'action du pilote sur les commandes. L'ordinateur sélectionne les gouvernes àactionner de manière àréaliser une manœuvre donnée et àpermettre le changement d'assiette le plus souple et qui exercera le moins de contraintes possibles sur les structures. De même, si les commandes de vol subissent une détérioration partielle et en présence d'une défectuosité ou de dommages, l'ordinateur pourra peut-être produire le changement d'assiette voulu sans que le pilote ne soit trop sollicité pour la manœuvre.

5.3.3 Technologies et concepts de cockpit perfectionnés

Il y a un certain nombre de technologies importantes qui se rapportent aux technologies et aux concepts de cockpit perfectionnés. Un bon nombre de ces technologies en sont à l'étape de la mise au point finale ou de la mise en service limitée sur des appareils militaires et sur certains gros aéronefs commerciaux. Les technologies de pointe pour le cockpit d'aéronefs commerciaux concernent surtout le traitement de la grande quantité de données produites et la présentation de l'information voulue à l'équipage de la manière la plus efficace et efficiente qui soit. Voici quelques-uns des concepts mis de l'avant par les nouvelles technologies de cockpit.

Conception ergonomique – L'ergonomie vise la conception de postes, de machines, du fonctionnement des machines et de milieux de travail qui tiennent compte dans toute la mesure du possible des capacités et des limites de l'opérateur humain.

Environnements de traitement ultrarapide de l'information – Ce genre de dispositif est exigé pour l'acquisition, le traitement et la présentation des données produites par les systèmes embarqués et les systèmes externes, de sorte que le personnel navigant soit informé en tout temps et avec exactitude.

Technologies de visualisation – Des technologies qui comprennent à la fois les collimateurs tête basse et les collimateurs tête haute sont exigées; elles visent également les panneaux plats, les casques de visualisation et la représentation tridimensionnelle. Ces dispositifs sont exigés pour le cockpit et la cabine, ainsi que pour les postes de travail en queue d'appareil à bord des aéronefs militaires ou scientifiques.

5.3.4 Technologies de surveillance des dommages de groupe moteur

Dans la catégorie des technologies de surveillance des dommages, le secteur a besoin d'un certain nombre de technologies et de concepts. Il convient dans un premier temps d'envisager les dommages non pas comme le résultat d'un incident fortuit tel que la pénétration d'un oiseau ou d'un caillou dans un réacteur, mais comme l'accumulation de l'usure ou de la fatigue de service et des dommages connexes.

Contrôle de l'usage – En ce qui concerne les moteurs d'aéronef, ce contrôle désigne la surveillance du démarrage et de l'arrêt des moteurs, ou des températures à des moments précis, de manière à recueillir de l'information sur l'accumulation générale de dommages. Les données servent ensuite à définir la durée de vie utile des éléments en regard de l'information technique et de l'usage réel. Lorsqu'il s'agit des aéronefs, le contrôle de l'usage prend souvent la forme d'extensomètres et d'accéléromètres disposés en différents points. L'information tirée de ces détecteurs et celle des données de vol peuvent ensuite aider à prévoir des problèmes de structures de grande importance ou des problèmes sur des points de l'appareil où la conception est défaillante.

Surveillance de l'état – La surveillance de l'état des moteurs d'un aéronef peut mettre à contribution une grande variété de sources d'information, y compris celle relative aux résidus d'huile, à la surveillance des vibrations, et aux indicateurs de nature générale comme ceux de la poussée. La surveillance de l'état de structures d'un aéronef portera sur la détection de la corrosion (capteurs de variables d'environnement) ou pourra faire intervenir des détecteurs à fibres optiques intégrés qui enregistrent la réaction des bords d'attaque et en indiquent la capacité de fonctionnalité résiduelle.

À l'heure actuelle, il y a un intérêt envers les technologies requises pour la détection des dommages de fatigue mégacyclique des moteurs d'aéronef. La fatigue mégacyclique s'entend d'une charge moyenne relativement basse, se caractérisant par la production rapide de cycles de charge pouvant dépasser 100 000 ou parfois 1 000 000 cycles. Ces charges successives entraînent de l'usure ordinaire et de l'usure de contact qui peuvent provoquer des fissures, entraînant elles-mêmes une défectuosité ou une dysfonction dans les secondes ou les minutes qui suivent.

5.4 Aérodynamique et mécanique du vol

L'aérodynamique est l'étude des forces qui agissent sur les voilures et les gouvernes sous l'effet de la pression de l'air et de l'écoulement de l'air (traînée). La mécanique du vol est l'étude du déplacement résultant des objets dans l'air, ce qui comprend la stabilité et le comportement des structures. Les lois du mouvement et de l'aérodynamique sont mises à contribution pour s'assurer que l'aéronef vole comme il se doit. Une grande partie des travaux d'aérodynamique et de mécanique du vol effectués pour la conception et la construction d'aéronefs au Canada traitent de questions comme la voilure améliorée, l'intégration de divers éléments dans un aéronef ou encore le vol d'un aéronef dans de mauvaises conditions, au cours desquelles le comportement correct de l'appareil peut par exemple être perturbé par la présence de glace sur les ailes. Le développement de technologies de pointe dans ce domaine visera le transport par avion supersonique et dans l'avenir, par avion hypersonique. L'aérodynamique et la mécanique du vol des aéronefs à voilure fixe et à voilure tournante varient considérablement et ces deux sous-domaines suscitent un intérêt appréciable dans le secteur canadien de l'aérospatiale et de la défense.

Les volets technologiques de l'aérodynamique et de la mécanique du vol sont décrits dans la section ci-après.

5.4.1 Analyse, conception et validation du calcul de la dynamique des fluides – Aéronefs

Au cours des 25 dernières années, parmi tous les outils de conception, le calcul de la dynamique des fluides est l'élément qui a eu la plus grande incidence sur la conception des aéronefs et des moteurs aéronautiques. La puissance des ordinateurs et leur coût ont permis l'utilisation élargie et la mise au point de techniques de calcul de la dynamique des fluides. Le calcul de la dynamique des fluides désigne essentiellement l'emploi d'ordinateurs pour la modélisation numérique d'écoulements donnés. Le système permet de circonscrire les nœuds dans le circuit d'écoulement et de solutionner les équations de déplacement dans le but d'établir les paramètres d'écoulement.

En bref, il s'agit de définir un maillage ou une grille sur la surface d'un objet, cette grille s'étendant vers l'extérieur jusque dans le champ d'écoulement qui contient l'objet. Des équations d'écoulement sont ensuite calculées pour chaque nœud de la grille, puis calculées à nouveau, jusqu'àce que chaque nœud présente un écart acceptable. Les équations employées sont soit les équations de Euler; elles ne comprennent donc pas directement les effets de viscosité (couches limites). Il peut également s'agir des équations de Navier-Stokes, dont la solution contient les effets de viscosité, ces équations étant de ce fait plus précises. Ces méthodes peuvent servir au calcul des écoulements extérieurs d'un aéronef ou des écoulements internes, comme ceux d'une turbine àgaz, ce qui comprend la combustion. Les analyses qui reposent sur les équations de Euler exigent habituellement moins de calculs, mais elles manquent cependant de précision aux fins de la modélisation des écoulements séparés sur les ailes et les cellules, ou pour les écoulements internes inversés. Il convient de noter que Navier a conçu ses équations en 1823 et que Stokes les a raffinées en 1845. La recherche de solutions pour ces équations n'a pu se faire avant la fin de ce siècle. Aujourd'hui, une bonne partie des travaux de recherche et développement sur les méthodes Navier-Stokes visent l'amélioration des modèles d'écoulement turbulent dans le but de régler des problèmes précis.

De nombreuses variantes des équations de Euler et de Navier-Stokes ont été produites dans le but de remédier àdes problèmes de conception particuliers. Les solutions de ces équations dépendent de l'expérimentation des deux coefficients et de leur validation subséquente.

La sélection du maillage et l'emplacement des nœuds jouent un rôle de premier plan dans la bonne définition d'un champ d'écoulement. La création automatisée de maillages est dorénavant réalisable et peut souvent être combinée aux outils d'ingénierie et de conception assistées par ordinateur. Les besoins de calculs dépendent de la forme d'équation utilisée, de la densité du maillage ou de la grille et des exigences de convergence. Les solutions pour la totalité d'un aéronef exigent d'énormes ressources informatiques et une grande partie de la recherche et du développement visent précisément l'accroissement de la vitesse de résolution.

5.4.2 Analyse et conception intégrées de profils aérodynamiques évolués

Au Canada, le développement de profils aérodynamiques évolués visera surtout la conception d'ailes destinées àdes aéronefs subsoniques ayant une capacité de moins de 120 passagers. Le travail sur les profils aérodynamiques évolués consistera àaccroître l'efficience et les vitesses de croisière, par la réduction de la traînée et l'amélioration des caractéristiques des structures et des gouvernes. Le profil des ailes, l'efficacité des gouvernes, les effets de l'interaction de la cellule et du moteur sur les ailes, et la conception des saumons d'aile sont des domaines d'intérêt en recherche et développement. Des projets de développement qui visent la production de volets àportance élevée sont aussi des domaines importants de recherche et développement et ont pour but de réduire la taille des ailes, ce qui diminuera d'autant les coûts.

Le contrôle de l'écoulement laminaire est un terme utilisé dans la Carte routière technologique CFRR. L'air qui s'écoule sur les ailes suit d'abord la cambrure des ailes; il s'agit d'un écoulement laminaire ou d'un champ d'écoulement ordonné. Plus l'air se rapproche des bords de fuite, plus grande est la turbulence causée par des facteurs aérodynamiques comme la vitesse, ainsi que par l'effet des ailes, comme leur forme et le frottement de surface. Il a été établi que s'il était possible de maintenir l'écoulement laminaire sur les ailes d'un gros aéronef, on pourrait réaliser des économies en carburant pouvant atteindre 25 p. 100. Les caractéristiques des ailes et du vol des petits aéronefs font en sorte que l'écoulement laminaire peut être maintenu assez facilement sur la plus grande partie du domaine de vol. Plusieurs méthodes peuvent servir àaccroître les surfaces de l'écoulement laminaire sur les aéronefs de plus grande taille qui ont des nombres de Reynolds élevés et des angles de flèche plus accentués.

Le calcul de la dynamique des fluides sera la technologie qui aura la plus grande importance pour le développement des profils aérodynamiques évolués. Un certain nombre de domaines qui intéressent particulièrement le secteur canadien de l'aérospatiale devront faire l'objet de travaux de recherche et développement et de soutien en conception d'aéronef. Il importe de raffiner les codes globaux du calcul et de la validation de la dynamique des fluides, de manière àaméliorer l'exactitude et àréduire le temps de calcul dans le cadre de la conception et de l'optimisation multidisciplinaires, grâce àune convergence plus rapide de la conception. Ces codes de calcul de la dynamique des fluides exigeront par ailleurs d'être validés en laboratoire et dans une soufflerie.

5.4.3 Intégration voilure, nacelle et propulsion

L'installation de tout objet externe sur une surface aérodynamique entraînera inéluctablement une perturbation du champ d'écoulement et créera de l'interférence entre les deux corps. L'effet aérodynamique produit variera selon l'emplacement dans le domaine de vol et les différentes assiettes de l'aéronef. L'interaction aérodynamique de ces corps et de la vitesse de croisière peut augmenter la traînée et provoquer une instabilité, puis une vibration ou des bruits sur les structures de la cellule que ressentiront les passagers. L'installation d'un réacteur sur un pylône fait en sorte qu'un corps de grande masse est placé au bout d'un mât. Les vibrations et les forces du moteur peuvent alors accentuer les effets aérodynamiques.

Pour les aéronefs à hélices, les effets peuvent s'accentuer, car le souffle de l'hélice produit un écoulement d'air supplémentaire sur les ailes. Cette observation vaut tout particulièrement pour les systèmes à hélices perfectionnées maintenant en service et pour les groupes moteur carénés, car le souffle de l'hélice contribue de façon marquée à l'écoulement d'air sur les aéronefs à faible vitesse. Cela peut entraîner de l'instabilité et des problèmes de contrôle de l'appareil, surtout dans l'éventualité d'une panne moteur.

L'emplacement d'un moteur et la conception du pylône, du canal d'entrée d'air, de la tuyère, de la nacelle et du fuselage à proximité du groupe moteur sont autant d'éléments très importants pour le rendement de l'aéronef, l'acceptation par les passagers et leur confort.

Des outils de conception analytique perfectionnés sont actuellement développés pour l'installation des moteurs à un emplacement judicieux sur l'aile. En règle générale, on se sert de codes du calcul de la dynamique des fluides, de conception des structures et de l'acoustique aéronautique pour configurer correctement la taille d'un groupe moteur et de ses éléments en vue de son installation sur une aile.

L'intégration du groupe moteur à la cellule des hélicoptères et des aéronefs à rotors basculants est un autre problème connexe. Cette question de l'intégration sur les hélicoptères soulève actuellement des considérations de conception mécanique. Toutefois, le refroidissement du système d'échappement dans le but de réduire les contraintes exercées sur la poutre de queue et l'exploitation de la poussée résiduelle dans les hélicoptères modernes actuellement conçus soulèveront des problèmes technologiques de taille qu'il faudra régler et dont les solutions devront elles aussi être intégrées.

5.4.4 Aérodynamique et comportement des aéronefs perfectionnés

Parmi ces technologies, il y a celles qui permettront au secteur canadien de l'aérospatiale de contribuer à la conception de l'aéronef perfectionné ou de ses éléments et d'en être le principal intégrateur de conception. Au nombre et au centre de ces technologies habilitantes, il y a surtout celle de l'échange de données sur les produits, dont il est question ailleurs dans le présent document. Il faudrait continuer le travail sur ces technologies habilitantes, dans la mesure où elles se rapportent aux possibilités de conception ou de prépositionnement pour la conception de plates-formes ou de modèles d'aéronef précis que voici :

- Aéronefs de transport de l'avenir – Les aéronefs de transport de l'avenir devront offrir des capacités de vitesse et de charge utile accrues et avoir une autonomie de vol beaucoup plus grande. Les avionneurs américains ont fixé des objectifs précis en matière d'aéronefs de transport de la génération future, même si, à l'heure actuelle, aucun nouvel aéronef de transport ne se trouve à une étape avancée de mise au point. Les facteurs de charge d'ailes seront le double de ceux des aéronefs actuels, grâce

aux nouveaux matériaux développés pour l'enveloppe des aéronefs. En ce qui concerne les aéronefs àplus court rayon d'action, une technologie habilitante importante sera celle des moteurs àturbopropulsion à haute efficience, offrant une gamme de vitesses de croisière au-dessus de Mach 0,72. La technologie de propulsion et les problèmes d'intégration de la propulsion, l'optimisation de la conception des aéronefs, le calcul de la dynamique des fluides et le développement et l'incorporation de nouveaux matériaux seront autant de facteurs importants qui contribueront au succès de l'aéronef de transport de l'avenir.

- Aéronef hypersonique – L'aéronef hypersonique se trouve dans la phase exploratoire ou à l'étape du développement avancé de modélisation. Ce type d'appareil servira initialement au lancement économique d'engins spatiaux et de plates-formes de ravitaillement, puis sera ensuite utilisé comme transporteur commercial. Les techniques de propulsion jouent un rôle de premier plan dans la faisabilité des aéronefs hypersoniques et en sont actuellement le principal handicap. Les moteurs à cycle variable, les matériaux perfectionnés, les carburants endothermiques et les techniques de régulation du carburant sont autant d'éléments technologiques en propulsion aéronautique où les efforts en recherche et développement laissent encore àdésirer. Il faut par ailleurs investir davantage dans la recherche sur de nombreux outils de contrôle et matériaux, même si ces domaines suscitent moins d'incertitude en raison des percées réalisées par le programme des navettes spatiales.
- Giravions perfectionnés – Les giravions de l'avenir offriront des vitesses de croisières de 200 kts et plus, tandis que la vitesse des appareils àrotors basculants avoisinera les 450 kts. Ces vitesses de croisière seront atteintes et s'accompagneront de niveaux de vibration très réduits, d'une autonomie beaucoup plus grande et d'économies en carburant appréciables. Un bon nombre des concepts techniques permettant de réaliser ces améliorations du rendement sont déjàà l'étape de la mise au point, mais il reste encore beaucoup de travail àfaire. Une autre technologie indispensable à la réussite du giravion de l'avenir concerne les techniques de visualisation et d'affichage, abordées plus loin dans le présent document.

5.4.5 Mécanique du vol des giravions perfectionnés

Aussi bien pour les hélicoptères conventionnels que pour les appareils àrotors basculants, les ailes et le groupe moteur fonctionnent dans un contexte aéromécanique d'une grande complexité. Les considérations relatives à l'aérodynamique, aux structures, aux vibrations et à l'acoustique sont indissociables de la conception de toute cette catégorie d'aérodynes. En vol avant compensé, le bord d'attaque de la pale en mouvement vers l'avant se déplace àune vitesse proche du mur du son, tandis que la vitesse de la pale en mouvement vers l'arrière se trouve souvent àdes vitesses proches du décrochage.

Les difficultés du vol de giravion dans de mauvaises conditions sont d'un intérêt particulier au Canada, car il y a fréquemment de la glace et les hélicoptères ont généralement de la difficulté àaffronter ce genre de conditions.

5.4.6 Conception et développement d'aéronefs perfectionnés de l'aviation générale

Les aéronefs pour l'aviation générale posent des difficultés de conception particulières sur tous les plans de leur conception et de leur fabrication. La disponibilité accrue de systèmes

d'avionique à faible coût et à rendement élevé, la conception en matériaux composites perfectionnés ainsi que l'intégration des groupes moteurs sont autant de possibilités offertes aux concepteurs et aux avionneurs de l'aviation générale.

Une bonne partie des technologies mises au point pour l'utilisation à bord d'aérodynes militaires télépilotés auront des retombées pour les aéronefs de l'aviation générale. Les technologies de turbine à gaz à faible coût et les questions de développement et de certification de structures en matériaux composites seront assurément celles qui susciteront le plus vif intérêt.

Le développement technologique à des fins militaires déterminera dans une large mesure les coûts reliés à l'introduction de ces concepts et de ces techniques dans l'aviation générale.

5.4.7 Conception expérimentale et validation des performances

La conception analytique et les techniques d'analyse sont des éléments préalables essentiels à la réduction du cycle de conception et des coûts de conception et de production ainsi qu'aux améliorations en matière de sécurité et d'impact environnemental. Le développement de ces outils de conception analytique ou numérique continuera de dépendre dans une très large mesure de la validation expérimentale des codes de conception et des objectifs de performance au cours des 10 à 15 prochaines années. Dans le passé, les ressources en expérimentation comme les souffleries servaient surtout à la mise au point et au raffinement techniques. Dans l'avenir, elles serviront de plus en plus à la validation des outils de conception par ordinateur. Sans diminuer la portée de ce qui précède, le secteur canadien de l'aérospatiale et de la défense aura encore besoin pendant un certain temps d'installations nationales comme les souffleries, les bancs d'essai de moteur et les installations d'essai en vol, ainsi que de ressources spécialisées comme les souffleries de givrage et les bancs d'essai génériques.

Pour soutenir le secteur canadien de l'aérospatiale, il faudra investir dans les domaines suivants de la conception expérimentale et de la validation des performances :

- Automatisation de la saisie et de l'analyse des données – Des méthodes automatisées de saisie et d'analyse de données seront exigées pour réduire le temps de production des grandes usines et surmonter les difficultés inhérentes à la validation des outils de conception. Cela nécessitera un investissement dans les détecteurs et les outils informatiques.
- Développement de codes expérimentaux – Il faudra améliorer la vitesse et l'exactitude de la saisie de données. Pour ce faire, il faudra élaborer des codes précis en matière de conception expérimentale et de validation des performances. Pour atteindre ces buts, il faudra conserver ou améliorer des installations et l'infrastructure connexe.
- Soutien en termes d'infrastructure – De concert avec d'autres ministères et avec l'industrie, il faudra soutenir la conservation d'installations nationales névralgiques. Il ne s'agira pas nécessairement de créer de nouvelles installations, mais plutôt d'optimiser la fonctionnalité des ressources existantes dans le but de satisfaire aux besoins des nouveaux développements technologiques.

5.5 Technologies de propulsion aéronautique et des turbines à gaz

Les technologies de systèmes de propulsion aéronautique et de turbines àgaz se rapportent à un large éventail de technologies habilitantes qui ont leurs propres difficultés : l'aérodynamique, la thermodynamique, la science des matériaux et la théorie des contrôles. En règle générale, les exigences de calcul pour la conception des turbines àgaz sont très élevées, car les champs d'écoulement et les champs de contrainte sont d'une nature fort complexe et doivent être bien compris pour que soient réalisées les performances techniques voulues. Le Canada fait partie d'un groupe très restreint de pays qui ont la capacité de réaliser en totalité la conception, le développement, l'homologation et la fabrication de turbines àgaz destinées à l'aérospatiale. Dans le passé, le Canada a surtout conçu des turbines àgaz de petite et moyenne tailles qui présentent des impératifs de conceptualisation souvent très différents de ceux de moteurs de plus forte taille. À l'instar des autres technologies essentielles, les principaux axes de développement technologique visent la réduction du cycle et des coûts de conception ainsi que des coûts de fabrication. En ce qui a trait aux technologies de la propulsion aéronautique, il faut aussi tenir compte de la difficulté additionnelle que représente l'impact sur l'environnement, car il faut réduire les émissions polluantes et les émissions de particules, visibles ou non.

Les volets technologiques des technologies essentielles de la propulsion aéronautique et des turbines àgaz sont décrits dans la section suivante.

5.5.1 Élaboration et validation du calcul de la dynamique des fluides – Turbines à gaz

Le calcul de la dynamique des fluides (CDF) est sans doute la technologie la plus essentielle concernant les turbines àgaz. Les besoins en matière de CDF ont en règle générale présenté les plus grandes difficultés qu'ont dû affronter les concepteurs de moteur et les développeurs de puissance de calcul et de codes. Le CDF revêt une importance vitale pour le concepteur de moteur, dans la mesure où les exigences et les contraintes de conception technique du domaine sont très précises et où il y a dans le monde un nombre très restreint d'entreprises ayant les compétences voulues dans la conception des moteurs.

Les techniques de calcul qui visent les turbines àgaz portent généralement sur des modules bien précis : le compresseur, la canalisation de transition, la chambre de combustion, la turbine et le canal d'éjection et le canal de postcombustion sur les appareils militaires en sont autant d'exemples. De même, les techniques de calcul se rapportent souvent à des classes de taille de moteur précises, ce qui fait que le Canada a une série d'exigences technologiques particulières, étant donné sa spécialisation dans les petites turbines àgaz.

Les codes tridimensionnels CDF serviront aux éléments suivants :

- Pour ce qui est du compresseur, développer des ailettes en flèche perfectionnées capables de produire un ratio de compression élevé et de produire un travail plus efficient, compte tenu d'un poids allégé et d'un nombre restreint de pièces (facteur important des coûts du cycle de vie).
- Pour ce qui est de la chambre de combustion, développer une chambre de combustion à plus grande intensité (à volume plus faible et produisant une énergie beaucoup plus concentrée) qui se rapproche de l'état stœchiométrique, capable d' offrir une efficience accrue àun poids moindre.

- Pour ce qui est de la turbine, mettre au point une alimentation àun étage supérieur, caractérisée par un refroidissement d'air réduit de la turbine, qui se traduirait làaussi par un poids moindre et des économies et une consommation de carburant amoindries.

5.5.2 Conception de chambres de combustion de turbine à gaz perfectionnées

La chambre de combustion d'une turbine àgaz est la partie du moteur qui reçoit l'air comprimé du compresseur. L'énergie produite s'ajoute à l'écoulement d'air dans la chambre de combustion sous forme d'énergie chimique produite par le carburant. L'air déchargé de la chambre de combustion traverse complètement une turbine ou plusieurs turbines, puis de l'énergie en est soutirée pour alimenter le compresseur et la boîte d'engrenage d'un turbopropulseur, ou encore pour produire dans un réacteur une poussée à l'aide d'un turboréacteur àdouble flux.

En raison de leur taille, les petites turbines àgaz du genre de celles qu'a toujours conçues et fabriquées le Canada posent des difficultés conceptuelles appréciables. En règle générale, ces chambres de combustion sont les modèles offrant la plus grande intensité de combustion, l'intensité étant la quantité d'énergie convertie en énergie mécanique par volume d'unité dans la chambre de combustion. Les objectifs de conception des moteurs àturbines àgaz, y compris ceux de petite taille, consistent àaccroître le taux de compression et àpermettre ainsi en bout de ligne une efficience accrue et une taille et un poids plus faibles; àaugmenter les températures cycliques pour produire également une efficience accrue, compte tenu d'une taille et d'un poids plus faibles, tout en produisant moins de bruit et d'émissions polluantes.

Parmi les défis que doivent relever les fabricants de moteurs canadiens en matière de développement de chambre de combustion, mentionnons les suivants :

Calcul de la dynamique des fluides – Les analyses de CDF sont compliquées en raison des procédés àflux inversé qui sont généralement retenus pour produire des chambres de combustion de faible longueur et àpetit volume. Le flux de refroidissement et les additions chimiques au CDF compliquent davantage le processus, du fait que la température des gaz au centre du double flux se situe bien au-delàdu point de fusion des matériaux qui composent la chambre de combustion. Pour améliorer les performances, il faut minimiser les pertes de pression et les exigences en flux de refroidissement.

Matériaux – L'augmentation du taux de compression signifie des températures de sortie du compresseur plus élevées et une capacité de refroidissement moindre. Ces températures plus élevées entraînent incidemment un rapport carburant/oxygène plus riche et une augmentation de la température dans la chambre de combustion. Un taux stœchiométrique désigne un état dans lequel tout l'oxygène est brûlé pendant la combustion, ce qui laisse très peu d'air pour le refroidissement. Les difficultés àsurmonter en termes de matériaux dans ces conditions sont les plus grandes.

Injection et mélange – Des techniques précises se rapportant au CDF et aux injecteurs sont exigées.

Émissions – Bien qu'il n'y ait pas d'exigences législatives précises àce chapitre et même si les systèmes de combustion n'y contribuent pas de façon substantielle, il y a une grande tendance vers les conceptions de chambres de combustion qui vont àcontre-courant des procédés et facteurs technologiques décrits ci-avant.

5.5.3 Techniques de conception efficaces aux plans énergétique et écologique

Deux problèmes fondamentaux caractérisent le volet technologique des facteurs de conception écologique pour les systèmes de propulsion aéronautique : le bruit extérieur et les émissions des gaz d'échappement.

L'objectif établi dans la Carte routière technologique CFRR en matière de réduction du bruit est de 6 EPNdB (niveau effectif de bruit perçu). Il est possible d'atteindre cet objectif par l'emploi de soufflantes de dérivation plus grandes, par des concepts innovateurs pour les turboréacteurs àdouble flux et par une conception des chambres àcombustion et des buses d'éjection et des tuyères qui tiennent compte du bruit causé. Dans l'ensemble, les impératifs d'atténuation du bruit et d'efficacité énergétique doivent tous deux être satisfaits pour les besoins des exigences réglementaires futures, mais non au détriment de l'efficience générale des moteurs. Les projets particulièrement intéressants seront ceux qui portent sur les réacteurs perfectionnés àsoufflante carénée, qui allient à la fois un niveau de bruit moindre et des possibilités d'efficience accrues. L'évolution de ce créneau technologique dépendra dans une très large mesure des techniques de conception assistée par ordinateur et de la conception et de l'optimisation multidisciplinaires.

La réduction des gaz d'échappement des aéronefs est une autre exigence réglementaire. Même si les petits moteurs d'aéronefs contribuent de façon marginale à la pollution, ils n'en sont pas moins la cible continue et croissante des instances environnementales. Les exigences environnementales en matière d'émissions polluantes visent les oxydes d'azote (NO_x), le monoxyde de carbone (CO) et les émissions de particules visibles. Les techniques d'analyse du calcul de dynamique de fluides se rapportant en particulier à la combustion seront le principal outil utilisé pour réduire les émissions des moteurs des aéronefs.

5.5.4 Analyse et optimisation de la conception des structures de turbines à gaz

Des cycles de conception écourtés s'imposent pour conférer un avantage concurrentiel au secteur canadien de l'aérospatiale et de la défense. Pour ce faire, il faut améliorer l'analyse des structures, la conception et l'optimisation des turbines àgaz. De cette façon, les concepteurs de turbines àgaz réaliseront également les objectifs globaux d'une durabilité et d'une efficience accrues àun coût moindre.

Il faut recourir àune méthode de conception et d'optimisation multidisciplinaires pour combiner l'analyse des éléments finis et les techniques de conception en aérodynamique. La conception et l'optimisation s'imposent pour définir la structure du moteur et cerner les points essentiels qui exigent une analyse plus complète et plus approfondie.

De nombreux codes de structures et d'aérodynamique et une bonne partie des dessins industriels sont assujettis à la propriété intellectuelle. Toutefois, l'intégration et le raffinement de ces codes demeurent un défi qu'il faut continuer àrelever.

5.5.5 Développement des matériaux à haute résistance à chaud

Les matériaux de pointe sont essentiels pour atteindre les objectifs de conception des moteurs de l'avenir. En résumé, les objectifs en termes de performances futures des moteurs peuvent se résumer ainsi : un meilleur rapport poussée/poids ou de puissance par rapport au poids; un taux de compression global et des températures cycliques accrus; une réduction du coût de

production; et une réduction du coût associé au cycle de vie utile. Les catégories de matériaux qui intéressent les fabricants de moteurs sont abordées ci-après.

Composites à matrice organique – Les matériaux composites à matrice organique et à haute résistance àchaud peuvent travailler jusqu'àune température de 650 °F et il est possible de les utiliser dans les éléments statiques et rotatifs d'un compresseur. Bien qu'il ne s'agisse pas au strict plan technique d'un matériau à haute résistance àchaud, un taux de compression accru entraîne une température de sortie du compresseur très élevée pour laquelle il faut des matériaux capables de soutenir des températures plus élevées que celles normalement requises des matériaux dans les structures d'aéronef en service. Les composites à matrice composite à haute résistance àchaud peuvent remplacer les éléments de matrice métallique au titane de certains types de composants, alors que les matériaux de matrice métallique au titane sont trois fois plus denses.

Les composites à matrice céramique sont des matériaux à haute résistance àchaud (2 000 °F) et àfaible densité (0,8 lb/po^3) qui ont une résistance relativement faible, soit habituellement moins de 50 KSI. C'est pourquoi ces matériaux servent à la fabrication de composants à faible résistance utilisés àune température élevée, comme dans la chemise de chambre de combustion, une vanne et les ailettes de turbine basse pression, où leurs caractéristiques de température permettent leur emploi sans besoin de refroidissement. Les matériaux composites à matrice céramique peuvent être de nature filiforme, àfibre ou àfibre continue renforcée.

Superalliages renforcés – À l'heure actuelle, les alliages renforcés ne sont pas disponibles ailleurs qu'en laboratoire. Ils offrent cependant une température de service qui se rapproche de celle des matériaux à matrice céramique et qui présentent une résistance beaucoup plus grande que celle des matériaux à matrice céramique, qui se situe à200 KSI. S'ils sont mis au point, ces matériaux serviront à la fabrication des disques de compresseurs et des roues de turbine, car leurs caractéristiques de température et de résistance donneront lieu àdes réductions appréciables de poids.

Composites à matrice intermétallique – Les matériaux intermétalliques renforcés sont eux aussi disponibles uniquement en laboratoire. Ils présentent des capacités de température de service pouvant atteindre 2 200 °F et ils offrent une densité comparable àcelle des superalliages courants au nickel.

Matériaux àstructure monocristalline – Des matériaux de pointe àstructure monocristalline au titane aluminisé sont actuellement développés afin d'être utilisés dans la section arrière des surcompresseurs.

5.5.6 Rendement des matériaux à haute résistance à chaud et développement des revêtements

Il y a de nombreux points en commun entre les systèmes de revêtement de nouveaux composants et ceux mis au point pour les composants réparés. Les systèmes de revêtement qui visent les nouvelles pièces font partie du cycle de conception du composant et peuvent dans une certaine mesure en influencer la conceptualisation, que ces considérations portent sur la sélection du métal de substrat ou, par exemple, de la conception d'une chemise de chambre de combustion.

D'excellents travaux en systèmes de revêtement ont été réalisés au Canada et ont mis à contribution un certain nombre de ministères, des groupes de recherche et développement en

systèmes de revêtement, des fabricants de matériel d'origine et des organisations de réparation.

Pour l'essentiel, un revêtement est appliqué sur un métal de substrat pour lui conférer un certain degré de protection dans les conditions de service. Les revêtements résistants à la corrosion sont utilisés pour protéger le substrat contre la corrosion par ingestion de particules ou des résidus solides de combustion. Les revêtements résistants à la corrosion protégeront le substrat contre un milieu corrosif ou serviront de matériau sacrificiel qui sera attaqué par la corrosion, plutôt que le substrat lui-même. Comme son nom l'indique, un revêtement de barrière thermique vise àprotéger un composant contre l'effet de températures qui dépassent la tolérance des matériaux.

Les systèmes de revêtement généralement conçus en fonction de leur compatibilité avec les matériaux qu'ils sont destinés àrecouvrir, ce qui comprend les matériaux soudés ou brasés. Parmi les procédés de revêtement utilisés dans le secteur canadien de l'aérospatiale et de la défense, mentionnons les suivants :

- le dépôt par vapeur physique ou chimique;
- les procédés par diffusion ou en caisse;
- l'aspersion thermique;
- le rechargement;
- le placage;
- les traitements de surface grande énergie, y compris l'implantation ionique et le traitement de surface au laser;
- la trempe au chalumeau et par induction.

5.5.7 Conception et validation du contrôle numérique et électronique des circuits d'alimentation

Selon les sollicitations du pilote sur la puissance, les conditions extérieures comme la température et la pression de l'air, et les paramètres internes détectés comme la vitesse et la température du système de commande d'un moteur sont autant de facteurs qui régissent automatiquement tous les sous-systèmes d'un moteur afin de le maintenir au bon régime et en bon état de fonctionnement. La commande de l'alimentation régira l'écoulement du carburant, la position des diverses pièces mécaniques, comme l'aube directrice d'entrée du purgeur et l'aube variable de stator, dans le but de garantir que le moteur fonctionne dans les limites de toutes les caractéristiques techniques nominales. Ces caractéristiques renvoient à des paramètres comme l'accélération, la vitesse et la température, qui sont régulés de manière à minimiser les problèmes aérodynamiques et thermodynamiques, y compris le décrochage.

Les contrôles électroniques numériques renvoient àune technologie achevée pour ce qui est du contrôle effectif des performances d'un moteur dans des limites précises. Certains des contrôles actuels offrent une fonctionnalité accrue, comme la surveillance des données d'utilisation. Les systèmes de contrôle perfectionnés du circuit d'alimentation devront offrir une fonctionnalité encore plus grande. Les contrôles perfectionnés amélioreront davantage les performances et réduiront les coûts reliés au cycle de vie utile d'un moteur. Les coûts en durée de vie utile seront réduits grâce au système de contrôle des composants et à la

surveillance intelligente des paramètres de fonctionnement du moteur, garantissant ainsi que le pilote pourra obtenir les performances voulues de la manière la moins dommageable possible.

Les systèmes de contrôle intelligents serviront également àgérer les dommages, graves et graduels, dans le but de s'assurer que le moteur peut fonctionner de façon optimale dans ces conditions détériorées. Ces contrôleurs intelligents offriront la possibilité de détecter l'approche d'un décrochage aérodynamique ou une vibration, et de déclencher la prise de la mesure corrective qui s'impose.

En outre, le système de contrôle du moteur fera en bout de ligne partie intégrante du système de contrôle intégré de l'aéronef, dans la mesure où les performances réalisées commenceront às'approcher des paramètres optimaux pour une configuration donnée.

5.5.8 Concepts d'intégration des composants

L'intégration des composants porte sur le jumelage efficient des divers éléments de conception d'une turbine àgaz de manière àproduire le moteur le plus efficient qui soit. Les projets d'intégration des composants viseront habituellement les activités de conception multidisciplinaire portant sur des calculs d'aérodynamique et de thermodynamique et sur des ensembles d'analyse des structures.

La conception d'un diffuseur, situé entre le compresseur et la chambre de combustion d'un moteur, serait un exemple d'intégration des composants. Le diffuseur offrira une rigidité structurale appréciable au moteur, tout en procurant par ailleurs un circuit d'écoulement à rendement élevé entre le compresseur et la chambre de combustion. Le profil des vitesses à l'entrée de la chambre de combustion vise àpermettre des pertes minimales en basse pression et une combustion à haut rendement, sans dommages.

5.5.9 Contrôle de l'état et de l'usage du matériel

Il s'agit d'un créneau technologique parvenu à maturité qui dépend dans une très large mesure de connaissances approfondies de la conception technique du moteur examiné. Dans l'ensemble, le contrôle de l'état et de l'usage du matériel procurera les avantages suivants :

- un coût de fonctionnement plus faible, car il est possible de changer les composants dès que leur rendement se situe sous la barre d'un seuil précis ou que l'usage réel de la pièce indique que la limite de vie utile sera atteinte sous peu;
- un coût de fonctionnement plus faible, car il est possible de surveiller la détérioration des composants et de les remplacer sur une base régulière, plutôt que de s'en tenir àun entretien ponctuel à la suite d'un bris imprévu àun moment ou dans des cond itions défavorables;
- des coûts plus faibles, car les inspections sans défectuosité relevée sont réduites au minimum;
- la possibilité d'une planification de mission reposant sur l'utilisation de l'aéronef le plus judicieux qui soit pour une mission ou un vol;
- une sécurité de vol accrue en raison du suivi régulier de la dégradation des composants et de leur remplacement avant que ne survienne un incident catastrophique.

Un large éventail de technologies ont été appliquées àce créneau et ont produit des résultats mitigés. La détection et la manipulation accrues et améliorées des donnés àbord permettent une fonctionnalité accrue en matière de contrôle de l'état et de l'usage du matériel.

5.5.10 Conception de banc d'essai et méthodes d'évaluation des performances

Les bancs d'essai utilisés pour les programmes de mise à l'essai des moteurs d'aéronef au Canada et ceux mis au point pour être vendus sont généralement des installations au niveau de la mer. Ils n'offrent donc que peu de possibilités de simulation en altitude, de vitesses de vol avant et de température ou de pression, voire aucune. Certains bancs d'essai offrant une capacité limitée existent au Canada pour la mise à l'essai des moteurs.

Cela étant dit, le Conseil national de recherches du Canada a pris part àde nombreux projets internationaux pour garantir l'existence d'un banc d'essai de calibre mondial qui servira aussi bien les besoins de mise à l'essai de qualification des moteurs, que les essais de performance et la mise au point de techniques d'évaluation des performances.

Les bancs d'essai pour moteurs se présentent sous diverses formes. Une installation au niveau de la mer sert à l'essai de qualification des moteurs, ce qui comprend la surveillance d'un nombre relativement limité de paramètres pendant une longue période de temps où l'utilisation du moteur en service est évaluée dans un laps de temps très court. L'essai de qualification comprend aussi l'ingestion d'eau et de glace afin de garantir que leur présence n'entraîne pas une dégradation inacceptable du moteur.

Les bancs d'essai en altitude, dont le Canada ne dispose pas, servent à la qualification des moteurs pour un domaine vol complet. Ils sont donc différents des essais davantage axés sur l'endurance des bancs d'essai au niveau de la mer décrits ci-avant.

Les bancs d'essai peuvent en outre servir à l'analyse de problèmes ou à la validation d'une solution àun problème. Dans ce dernier cas, les bancs d'essai exigent souvent des ensembles d'instrumentation perfectionnés et une conception beaucoup plus soignée, afin de garantir que les paramètres de performances sont mesurés correctement.

À l'heure actuelle, l'intérêt de nombreux pays du monde à l'égard des technologies perfectionnées de banc d'essai porte sur les bancs d'essai utilisés pour le développement des aéronefs hypersoniques destinés aux usages militaires ou aux lanceurs spatiaux. Ce type de banc d'essai est très onéreux en ressources et hautement spécialisé.

5.6 Matériaux de structures d'aéronef

La conception d'une structure d'aéronef vise à offrir la résistance, la rigidité et la durabilité voulues, compte tenu d'un poids et de coûts aussi bas que possible. Pour bien choisir et concevoir un élément de la structure, il incombe de bien en comprendre les conditions de service. Ces conditions de service exigent une compréhension de la magnitude et de la fréquence des cycles de charge, de la présence de facteurs de transformation comme la corrosion ou les dommages causés par un impact, et de divers autres facteurs. De plus en plus, la conception technique des matériaux repose sur des besoins précis et leur fabrication vise souvent àconférer au matériau des propriétés structurales améliorées en termes de charge orientée. La conception analytique et les techniques d'analyse sont principalement en butte aux problèmes d'application des propriétés axiasymétriques des matériaux. La conservation des propriétés nominales initiales ou prévues des matériaux pendant toute la

durée de vie utile d'un composant fait aussi partie des difficultés à résoudre, de manière à minimiser les risques d'une défaillance causée par la corrosion ou d'autres phénomènes de défectuosité reliés à l'usure. Enfin, on intègre dans les aéronefs des systèmes pour effectuer une surveillance constante des charges et des conditions de service, de sorte que la durée de vie utile maximale puisse être atteinte pour chaque aéronef ou composant.

Les volets technologiques de la technologie essentielle des matériaux de structures d'aéronef sont décrits ci-après.

5.6.1 Développement de procédés de fabrication métallique

Cette technologie essentielle est consacrée aux techniques de fabrication et aux méthodes d'usinage de trois catégories de matériaux métalliques, en l'occurrence les alliages légers, les alliages à grande résistance structurale et les alliages à haute résistance à chaud.

Même si cette classification est quelque peu arbitraire, la catégorie des alliages légers comprend les matériaux composites à matrice métallique, les alliages au lithium, la métallurgie des poudres à l'aluminium, ainsi que d'autres nouveaux types d'alliages comme le scandium-aluminium et l'aluminium moussé.

Les alliages à grande résistance structurale comprennent le bêta-titane et les nouveaux alliages ferreux.

Les alliages à haute résistance à chaud comprennent les composites à matrice de titane, quelques-uns des nouveaux alliages au titane comme le Ti-62222 et l'aluminure de titane, de nouveaux superalliages comme le siliciure de niobium.

5.6.2 Développement de procédés de fabrication à l'aide de matériaux composites

Les matériaux composites examinés dans cette technologie essentielle sont caractérisés par le renforcement à fibre d'une matrice polymérique. Habituellement, la matrice se compose d'une résine époxy, mais d'autres matériaux de matrice sont utilisés, comme du polyétheréthercétone et du polyamide. Les fibres employées sont généralement à base de carbone, même si du fibre de verre et d'aramide sont utilisés à des fins spéciales.

Un aspect des efforts en recherche et développement de ce créneau vise l'utilisation de ces matériaux dans les concepts de structures perfectionnées. Il s'agit entre autres de techniques de fabrication de pointe comme le brochage, le tressage, le moulage par transfert de résine, la pultrusion et la polymérisation perfectionnée (traitement au faisceau électronique, à faible énergie et chauffage par induction).

Les travaux effectués dans le domaine ont entre autres pour objectifs la réduction des limites de contraintes nominales permises. Une meilleure compréhension des matériaux, des procédés de production, de la conceptualisation des structures, des facteurs de défaillance et de la vulnérabilité aux effets du milieu favorisera une confiance accrue envers leur utilisation. Ce faisant, l'industrie pourra utiliser les matériaux de façon plus efficiente et plus judicieuse. Cette nouvelle compréhension aura par ailleurs des retombées en matière d'essais de qualification des matériaux, les coûts et leur durée s'en trouvant réduits. Un autre avantage tient au fait qu'il en résultera des contraintes nominales permises plus élevées. Le but ultime consiste à améliorer le rendement économique des cellules d'aéronef produites.

L'établissement de contraintes nominales admissibles plus élevées pour les matériaux composites àbase de résine se heurte àune obstacle bien précis : la résistance aux dommages causés par un impact, laquelle exige que l'on développe la technologie des matrices polymériques et les techniques d'assemblage comme le brochage àtravers plusieurs couches de matériaux, dans le but d'améliorer la résistance au délaminage.

5.6.3 Développement et vérification des caractères de systèmes à matériaux hybrides

Les matériaux hybrides les plus importants du point de vue de la cellule d'aéronefs sont les stratifiés de métal en fibres. Ils se composent habituellement de minces couches alternées d'un alliage d'aluminium de construction et d'un matériau composite préimprégné, normalement du verre-époxy unidirectionnel. La première et la dernière couches sont toujours métalliques. Il faudra beaucoup d'efforts de recherche et de développement en techniques de conception analytique, en tolérance à la fatigue et aux dommages aux fins des essais de réception réglementaires de ces matériaux. Il faudra par ailleurs développer des méthodes de production judicieuses pour la fabrication et l'assemblage des composants.

5.6.4 Systèmes de revêtements et traitements des surfaces écologiques

Cette technologie essentielle concerne au premier chef le remplacement, pour des raisons environnementales, des revêtements actuels de chrome et de cadmium et des procédés connexes.

Le placage au cadmium par électrodéposition est utilisé dans l'industrie comme agent anticorrosif depuis de nombreuses années. Il a acquis une grande popularité dans le secteur de l'aérospatiale en raison de la similitude de ses propriétés galvanoplastiques et de celles de l'aluminium. Il a donc servi au placage de nombreux substrats métalliques.

Le dépôt par vapeur chimique et physique de l'aluminium et les procédés de placage alcalins et acides au zinc-nickel sont des méthodes courantes de remplacement du cadmiage. L'aluminisation – c'est-à-dire le procédé qui consiste àrevêtir un matériau d'une fine couche d'aluminium – comprend les procédés traditionnels comme les procédés discontinus ou continus de trempage, de placage et de pâte de métallisation àchaud, suivis d'un traitement à chaud par diffusion d'aluminium dans la masse métallique et la formation d'une couche de diffusion protectrice. La diffusion directe ou la diffusion en caisse (cémentation en caisse) est l'une des méthodes les plus courantes d'aluminisation àgrande échelle. Un traitement de revêtement d'aluminium par diffusion au moyen de la technique de cémentation en caisse a offert une protection satisfaisante des métaux contre l'oxydation, àdes températures situées entre 500 et 700 °C. Par contre, la cémentation en caisse fait intervenir l'emploi de matières et de procédés dangereux.

Le chromage par électrodéposition est utilisé régulièrement pour le revêtement des composants d'aéronef afin de les protéger contre l'usure et pour l'emploi dans les systèmes hydrauliques. D'autres procédés comme le procédé oxygène et gaz combustible àgrande vitesse (HVOF), le dépôt par vapeur physique et d'autres techniques existent et n'exigent pas l'emploi de substances toxiques et ils ne donnent pas lieu à la production de sous-produits toxiques.

Le procédé HVOF est une technique àbase de poudre en vertu de laquelle les résidus toxiques liquides ou sous forme de brouillard (chrome hexavalent) sont éliminés. Le procédé comporte l'allumage des gaz de combustion, qui chauffent et propulsent ensuite la poudre

métallique sur une pièce fixée àun banc de travail, dans une cabine de pulvérisation spéciale. Le métal fondu frappe la pièce et appose sur sa surface un revêtement dense.

Les revêtements par le procédé HVOF (WC Co- tungsten-cobalt) ont les mêmes propriétés empiriques que celles du chrome dur en ce qui a trait à la corrosion résultant de la fatigue, de l'usure, de l'adhésion et de la friction. Toutefois, l'uniformisation dans l'industrie en est toujours à l'étape de développement et les données techniques pour les aéronefs sont actuellement recueillies.

5.6.5 Structures et matériaux intelligents

Une structure intelligente désigne une structure dans laquelle se trouvent des détecteurs et des vérins de commande, raccordés àdes dispositifs électroniques de traitement de signaux et de contrôle. La structure intelligente mesure les changements qui surviennent dans les conditions d'exploitation ou de service à l'aide des détecteurs. Le processeur connexe surveille les changements et les enregistre dans un dispositif de stockage, recommande des mesures correctives ou de diagnostic, ou encore agit sur les vérins de commande pour procéder àun ajustement des propriétés de la structure. Par rapport aux structures plus conventionnelles, les structures intelligentes présentent l'avantage de pouvoir s'adapter au milieu ambiant, selon l'évolution des conditions environnantes. La capacité réactive immédiate de la structure intelligente signifie qu'elle peut demeurer « en phase » avec les conditions du moment et conserver son efficacité, tandis que les systèmes plus courants auraient constamment besoin d'être entretenus ou que leur exploitation devrait se faire aux conditions inférieures aux paramètres optimaux de rendement. Il s'agit sans aucun doute d'une qualité des plus intéressantes pour la plupart des usages en aéronautique, notamment pour les commandes de vol qu'il faut constamment ajuster avec précision, et dont la configuration peut varier considérablement, selon les conditions du vol, comme la météorologie, la charge utile, ou même les conditions de décollage et d'atterrissage. Parmi les différentes structures intelligentes en voie de développement, les plus prometteuses pour l'aéronautique sont les technologies qui portent sur le contrôle des formes, la suppression du battement des gouvernes, le contrôle de la vibration, l'atténuation de l'effet des charges, et la surveillance des charges et de l'état du matériel.

5.7 Systèmes aéronautiques

Wymore (1993) définit la systémique comme « la discipline intellectuelle, universitaire et professionnelle dont la principale sphère d'activité consiste àgarantir que toutes les exigences d'un système bionique, de matériel et de logiciel sont respectées pendant tout le cycle de vie du système ».

La systémique est décrite comme le processus dans lequel tous les besoins fonctionnels se traduisent en caractéristiques techniques de sous-élément dont la combinaison permet d'atteindre les objectifs de la conception globale. Il s'ensuit que les sous-éléments ou parties constitutives du système complet sont conçus et développés de façon beaucoup plus efficiente. L'intégration de ces sous-systèmes est la clé de la réussite du processus. La technologie essentielle des systèmes aéronautiques comprend les volets technologiques voulus pour l'optimisation et la mise en application de certaines fonctionnalités dans un aéronef. Ces volets technologiques peuvent viser des besoins techniques uniques comme les systèmes de détection de la glace, ou ils peuvent se caractériser par un besoin d'intégration

très poussée avec d'autres systèmes aéronautiques, de manière àgarantir la réalisation de la meilleure conception qui soit.

Les volets technologiques de la technologie essentielle des systèmes aéronautiques sont décrits ci-après.

5.7.1 Conception de train d'atterrissage et intégration à la cellule

Cette technologie essentielle se rapporte à l'amélioration des performances de trains d'atterrissage, des matériaux et des procédés de fabrication; àune conception et àdes méthodes d'analyse plus perfectionnées; et àune intégration plus poussée des systèmes. D'autres créneaux technologiques essentiels ont une incidence appréciable sur la conception, la mise à l'essai et la fabrication des trains d'atterrissage.

La section ci-après aborde plus en détail les éléments de la technologie essentielle des trains d'atterrissage.

Performances du train d'atterrissage

- Systèmes d'amortissement actif, semi-actif et passif, dans le but de minimiser la charge à l'atterrissage et pendant le roulement au sol.
- Le train d'atterrissage principal peut comprendre une servodirection afin de permettre les diverses manœuvres requises au sol.
- L'emploi des fonctions et des diagnostics de contrôle de l'état du matériel. Cette technologie est particulièrement bien adaptée aux applications militaires, mais il est également possible d'en envisager l'utilisation sur les aéronefs commerciaux (cette technologie permet de mieux surveiller la bonne répartition du poids parmi les multiples trains d'atterrissage des gros aéronefs).

Matériaux et procédés de fabrication

- Il faut rechercher de nouveaux matériaux afin de combler le besoin d'équilibre entre diverses exigences àrespecter, comme le poids, le coût, la résistance, la tolérance aux dommages, la résistance aux conditions de service et les problèmes d'usinabilité.
- Parmi les matériaux aux usages actuellement limités, il y a le titane 10.2.3, l'Aermet, le AF1410 et le Hy-Tuf. Les composites à matrice de titane et d'aluminium présentent des possibilités, tout comme les composites métalliques hybrides et polymériques, bien que dans un avenir plus éloigné.
- Il faut régler les problèmes d'établissement de bases de données sur les propriétés des matériaux et d'usinabilité.
- Il faut par ailleurs améliorer et remplacer les revêtements de protection contre l'usure et la corrosion de manière àatteindre les objectifs fixés pour la conformité aux paramètres nominaux et environnementaux.

Méthodes de décision et d'analyse

- Il faut améliorer les méthodes de conception analytique et d'analyse afin d'obtenir une plus grande exactitude et, ce faisant, une meilleure productivité.

- Il faut utiliser des technologies de pointe pour l'analyse de la tolérance aux dommages et l'établissement du rythme d'évolution des fissures dans les structures.
- Il faut améliorer les techniques de simulation dynamique, dans le but d'utiliser en bout de ligne les méthodes axées sur l'analyse des éléments finis. Ces techniques sont exigées pour les analyses comme celles sur le brouettage, les performances de roulement au sol et le confort des passagers.
- Il faut améliorer les méthodes de validation expérimentale et rendre ainsi la conception et l'analyse plus efficientes.
- Les exigences en matière de poids, de flottation et de manœuvre de roulage au sol des gros aéronefs de transport de l'avenir nécessiteront la mise au point de méthodes de conception et d'analyse précises.

Capacité accrue en intégration de système

Les systèmes et les sous-systèmes de train d'atterrissage comprennent un grand nombre des éléments suivants : l'ensemble amortisseur, la bielle de traînée, l'ensemble de verrouillage train rentré, train sorti, l'ensemble vérin de rentrée, les canalisations hydrauliques et les faisceaux de câbles électriques, les roues, les pneus et les freins, les systèmes de commande, d'antidérapage et de surveillance de la température des freins, le système de commande et d'indication de la position du train d'atterrissage (hydraulique et électrique), le système de sortie manuelle du train, les manomètres pour les pneus, la détection de surchauffe dans le compartiment de train d'atterrissage, le système de masse et centrage, et les trappes et mécanismes connexes de train d'atterrissage. Pour être concurrentiels, les fabricants de trains d'atterrissage doivent être en mesure d'effectuer l'intégration du système de trains d'atterrissages complet, jusqu'aux commandes connexes dans le cockpit.

5.7.2 Conception et intégration de systèmes de conditionnement d'air

Le système de conditionnement d'air d'un aéronef régit la pressurisation constante et la température de la cabine, en plus d'assurer le refroidissement collatéral des systèmes d'avionique.

Pour demeurer concurrentielle, la prochaine génération de commandes de système de conditionnement d'air devra faire partie intégrante du sous-système des circuits de servitude intégrés. Les clients continueront d'exiger les fonctions usuelles du système de conditionnement d'air que sont la pression et la température dans la cabine et le refroidissement des systèmes d'avionique, mais àun coût plus bas du cycle de vie. De plus, il faudra prévoir la répartition des fonctions de refroidissement de l'avionique plus efficientes et sur demande, àun poids et àun volume plus faibles, pour le refroidissement des charges thermiques qui caractérisent le développement des capacités en augmentation rapide des ensembles d'avionique. Ces nouvelles fonctions exigeront l'apport d'un régulateur électronique très fiable et de nouvelles technologies d'échangeur de chaleur. Pour faire fonctionner un circuit de servitude fortement intégré, la fiabilité et la disponibilité du système de conditionnement doivent être largement supérieures àcelles de la génération actuelle d'ensembles de conditionnement électronique. Les moyennes de temps de bon fonctionnement visées pour la nouvelle génération de régulateurs est de 100 000 heures. Pour atteindre ces objectifs, il faut développer des ensembles électroniques insensibles aux défaillances qui font appel à l'avionique modulaire intégrée, qu'accompagneront des capacités de logiciel connexes. Il s'agirait en l'occurrence d'offrir aux avionneurs un matériel

de conditionnement mécanique à grande fiabilité. Ces nouveaux systèmes auraient un coût du cycle de vie beaucoup plus faible, même si les coûts d'acquisition initiaux se compareraient à ceux de la génération actuelle de matériel.

5.7.3 Développement de systèmes de commandes de vol perfectionnés

Les systèmes de commandes de vol électriques désignent les systèmes dans lesquels un ordinateur interprète les sollicitations du pilote sur les commandes et les transforme en mouvement des gouvernes, ce qui modifie par voie de conséquence l'assiette de l'aéronef. Les signaux sont transmis par des câbles électriques aux gouvernes. Ce type de système permet à l'ordinateur d'opter pour la configuration optimale des gouvernes pour une manœuvre donnée, tout en laissant au pilote la capacité d'agir manuellement sur les commandes de vol pour contrebalancer la détérioration du système ou des dommages qui surviendraient. Toutefois, il faut savoir qu'un système à câbles électriques peut subir l'effet des impulsions électromagnétiques et il est également impératif de prévoir un blindage renforcé des câbles pour les protéger contre la foudre.

Les objectifs de développement technologique du secteur canadien de l'aérospatiale et de la défense dans la technologie essentielle des systèmes de commandes de vol perfectionnés sont exposés sommairement ci-après :

- définir l'architecture d'un système de commandes de vol à câbles électriques économique, insensible aux défaillances et triaxial pour un aéronef capable de transporter entre 70 et 120 passagers;
- définir les principes théoriques qui régiraient un tel système de commandes de vol à câbles électriques;
- examiner l'interface homme-machine voulu pour obtenir la solution économique optimale, soit probablement par l'entremise d'un simulateur sans système de mouvement et de techniques de réalité virtuelle;
- évaluer les méthodes d'actionnement économiques devant être incorporées dans l'architecture retenue;
- définir les interfaces des détecteurs, du guidage en vol, de l'avionique, de l'alimentation électrique de l'aéronef, etc.;
- formuler un programme de démonstration en vol et effectuer un essai en vol pour la validation des éléments susmentionnés.

Les systèmes de commandes de vol par câbles électriques font maintenant partie de la technologie reconnue pour les aéronefs commerciaux qui transportent 120 passagers ou plus. Toutefois, cette technologie n'est probablement pas très rentable dans les avions qui transportent moins de 50 passagers. Le défi consiste donc à produire un système de commandes de vol par câbles électriques qui satisfait aux critères du coût, tout en offrant les avantages de commandes de vol par câbles électriques sur le plan des paramètres d'exploitation d'un aéronef.

Les systèmes de commandes de vol par câbles électriques sont exploités sous une forme ou une autre depuis de nombreuses années. Le Concorde SST et les appareils militaires ont été parmi les premiers utilisateurs de la technologie. D'autres appareils commerciaux ont été équipés de commandes de vol par câbles électriques un peu plus tard, Airbus devenant la

première société aérienne àadopter cette technologie pour le A-320, et Boeing lui ayant emboîté le pas sur le B777. Airbus a également équipé les appareils A-330 et 340 du système de commandes de vol par câbles électriques. Les systèmes de commandes de vol par câbles électriques seront supplantés dans l'avenir par les commandes de vol par fibres optiques. Il en sera question plus loin dans le présent document.

5.7.4 Développement de l'aéronef aux systèmes entièrement électriques

L'aéronef aux systèmes entièrement électriques désigne un aéronef dans lequel les éléments du circuit hydraulique sont remplacés par des éléments électriques. Le but visé est de réduire le poids et d'augmenter la fiabilité des systèmes. En bref, des génératrices électriques fourniraient l'alimentation électrique aux vérins électriques pour actionner les gouvernes. Les câbles électriques sont généralement plus légers et moins susceptibles de s'endommager ou de se détériorer à l'usage et de provoquer une vibration des composants susceptible de provoquer une fuite des circuits hydrauliques. Une source d'alimentation électrique en double est un autre avantage inhérent àce concept.

Les difficultés àsurmonter pour l'intégration de cette technologie se rapporteraient aux interférences électromagnétiques.

5.7.5 Développement des commandes de vol à fibres optiques

Les commandes de vol àfibres optiques ont l'avantage d'être très légères et offrent la possibilité d'accroître la sécurité des vols. Les câbles de fibres optiques ne subissent pas d'interférence électromagnétique et ne sont donc pas affectés par les champs créés par d'autre conducteurs ou d'autre dispositifs électriques situés àproximité ou encore par la foudre. Dans les commandes de vol proprement dites, des vérins hydrauliques ou électriques sont toujours employés, mais ils sont commandés par des câbles àfibres optiques.

La réduction de poids est appréciable, car les câbles àfibres optiques n'ont besoin d'être protégés que contre les dommages physiques, tandis que les câbles électriques exigent un blindage, lequel en accroît considérablement le poids. Par ailleurs, dans une connexion par câbles àfibres optiques, de nombreuses voies de transmission sont déjà offertes et bien séparées; elles peuvent donc offrir la redondance voulue des commandes.

Pour permettre l'insertion de cette technologie, il importe de développer un certain nombre de technologies habilitantes. Il faut entre autres produire des connecteurs de fibres optiques placés sur les conducteurs et aux extrémités qui sont à la fois durables et insensibles aux activités d'entretien pendant l'exploitation. Il faudra aussi développer des détecteurs àfibres optiques, afin de pouvoir tirer pleinement profit de toute la gamme d'avantages inhérents à un aéronef équipé de fibres optiques.

Cette technologie accompagne habituellement les concepts de structures intelligentes comme les enveloppes intelligentes dans lesquelles le câblage àfibres optiques peut déjàavoir été inséré dans plusieurs couches superposées de matériaux composites, dans le but d'offrir une capacité de détection répartie des dommages, des contraintes, des écarts de température ou des vibrations.

5.7.6 Mesures actives antibruit et antivibration

Les mesures actives antibruit et antivibration peuvent améliorer le confort des passagers et l'efficacité de l'équipage en réduisant simultanément le bruit et la vibration dans la cabine et le cockpit. Elles peuvent augmenter les performances nominales d'un appareil commercial et militaire en réduisant les vibrations et améliorer l'exploitation d'un aéronef et réduire les coûts du cycle de vie par la diminution la charge causée par la fatigue que provoquent le bruit et la vibration.

Les mesures actives antibruit et antivibration fonctionnent selon le principe de base de l'interférence destructive, en vertu de laquelle l'onde de son ou la vibration indésirable est contrée par une onde d'égale amplitude et déphasée de 180 degrés. Il s'ensuit une suppression du bruit et l'élimination du son ou de la vibration indésirable. Ce principe est mis en application dans de petites structures, y compris dans les casques suppresseurs de bruit, les systèmes d'atténuation de transformateur, et dans la réduction des bruits intérieurs dans les automobiles et les aéronefs.

La technologie afférente se compose de détecteurs, de formage de signaux, d'un système de contrôle, d'un amplificateur de puissance et d'un actionneur. Dans un système actif antibruit et antivibration traditionnel qui fonctionne dans une harmonique constante, le champ sonore serait détecté à l'aide d'une série de microphones et les signaux seraient analysés par un processeur central ou un dispositif numérique combiné de traitement des signaux. Un algorithme d'optimisation aide ensuite àdéterminer la meilleure répartition du son àparti r des haut-parleurs, du point de vue de l'intensité et de la phase, de manière àréduire globalement le niveau du bruit.

Dans ces systèmes, un certain nombre de détecteurs ou capteurs et d'actionneurs sont utilisés. Les détecteurs employés dans cette technologie comprennent les capteurs de proximité de courants de Foucault, les tachymètres (capteurs de vitesse), les accéléromètres, les microphones et les capteurs piézoélectriques.

L'actionneur le plus couramment utilisé dans les mesures actives antibruit est un haut-parleur relativement simple, muni d'un écran acoustique variable. Les haut-parleurs servent surtout à supprimer le bruit ou les ondes sonores par la production « d'une onde sonore fantôme » qui contre le bruit indésirable. Une autre technique de mesure active antibruit consiste à supprimer le bruit à la source. Dans ces dispositifs, les céramiques piézoélectriques et les agitateurs électromagnétiques connaissent une certaine popularité, particulièrement pour l'élimination des vibrations de tableau de bord. Ces dispositifs sont considérés comme autant de mesures actives antibruit, car leur finalité est de réduire la quantité de bruit perçu par l'ouï e. Toutefois, les mesures actives antibruit et antivibration sont aussi avantageuses pour les passagers puisque les niveaux de vibration sont réduits et que leur confort est accru.

5.7.7 Systèmes de détection, de gestion et d'élimination de la glace

Les sociétés aériennes régionales et les propriétaires d'hélicoptères qui exploitent des aéronefs dans l'espace aérien inférieur sont de plus en plus exposés àdes conditions de givrage dangereuses. Cette situation a accru le besoin de technologies préventives de détection et de protection contre la glace. Les technologies préventives sont celles qui se rapportent à la détection du givrage de retour et qui cherchent àen surveiller l'évolution en temps réel ou àen déduire la détérioration concomitante des performances aérodynamiques. Les systèmes préventifs permettent de prédire les possibilités de conditions de givrage et

transmettent de l'information en vol au pilote sur les moyens d'éviter ces conditions. Les systèmes réactifs offrent une protection raisonnable à l'aéronef dans le domaine de vol réglementé, mais ils servent essentiellement àaider le pilote dans sa décision de décoller ou de ne pas décoller. Les pilotes d'aéronefs militaires participant àune mission de recherche et de sauvetage et la plupart des pilotes d'aéronefs de transport civils ont rarement le choix d'éviter ou non des conditions de givrage dangereuses. Ces aéronefs devraient donc être équipés de systèmes préventifs d'information en vol et de dispositifs de dégivrage.

Parmi les dispositifs réactifs de détection de la glace, il y a notamment les capteurs intégrés qui sont fixés sur la surface des ailes, en des points névralgiques et qui permettent de suivre l'accumulation de la glace; et les capteurs de performances aérodynamiques, qui permettent généralement de surveiller la pression sur la couche limite de l'aile et d'évaluer ainsi la dégradation de la portance.

Les systèmes préventifs exigent la télémesure de la teneur en eau liquide, de la température extérieure et du diamètre moyen du volume de l'eau liquide. La connaissance de ces trois paramètres est impérative pour prédire les conditions de givrage dangereuses. D'autres efforts de recherche et développement sur la mesure du diamètre moyen du volume s'imposent.

Les systèmes de contrôle de la glace et de dégivrage peuvent mettre àcontribution l'air chaud des moteurs ou des éléments chauffants pour éliminer la glace sur la surface des ailes. Il est également possible d'envisager l'emploi de revêtements dits « chasse-glace », de manière à prévenir l'accumulation de la glace. Il faut des outils de calcul de la dynamique des fluides pour analyser les caractéristiques de l'accumulation de la glace, évaluer la dégradation des performances aérodynamiques, et améliorer le dégivrage dans les systèmes d'aération des aéronefs.

Ce créneau technologique soulève un intérêt particulier, compte tenu des types d'appareils construits au Canada et des conditions climatiques qui caractérisent le pays.

5.8 Simulation et modélisation

Les technologies de simulation et de modélisation comprennent un certain nombre de technologies interdépendantes qui visent simultanément les systèmes embarqués et les besoins au sol. Les technologies de visualisation comprennent la création et la manipulation d'images numériques d'après des calculs ou de multiples capteurs àbord d'un aéronef, par un lien air-sol, ou encore par un autre aéronef ou un satellite. Les procédés de visualisation comprennent des dispositifs perfectionnés comme les panneaux plats et des éléments comme la projection par micro-laser pour simulateur, ainsi que les concepts de pointe de la représentation tridimensionnelle qui utilisent des écrans de visualisation àdeux dimensions. Ces techniques de visualisation vont au-delàdes besoins d'exploitation ou de la formation; elles trouvent leur application dans des centres de fabrication, où des salles des machines servent à l'élaboration des procédés de fabrication àgrande échelle dans des usines virtuelles. Les technologies de visualisation sont également étroitement liées à la simulation et à la modélisation pour l'acquisition, la pratique des missions et la formation. Les études de systèmes industriels seront de plus en plus intégrées au travail de conception, par le développement et la mise en application de nouvelles techniques de simulation. Les exercices de mission ont augmenté de façon marquée les chances de survie des pilotes militaires qui peuvent piloter dans des conditions d'exercice très réalistes àplusieurs reprises avant que ne commence la véritable mission. Cet aspect des exercices de mission prend une autre

dimension dans les aéronefs commerciaux, l'on pourrait consacrer davantage de temps à l'exercice des interventions en situation d'urgence pendant les périodes de vol sur pilote automatique.

Les volets technologiques de la technologie essentielle de la simulation et de la modélisation sont décrits ci-après.

5.8.1 Simulation et modélisation pour l'acquisition (mission), les exercices et la formation (SMART)

Le procédé SMART porte la simulation et la modélisation à des sommets inégalés. Au début du processus, la simulation et la modélisation servent à établir les fonctions requises d'un système avant son développement. Cette étude industrielle est réalisée dans des conditions synthétiques et génériques de très haut niveau qui permettent l'exploration de la gamme complète des exigences de fonctionnalité du système envisagé, qu'il s'agisse d'une application commerciale ou militaire, pour laquelle des mises en situation de menaces futures peuvent faire l'objet d'exercices. Ces données sont saisies au cours de l'étape d'acquisition, où la simulation et la modélisation interviennent de nouveau pour définir les données d'acquisition et les coûts du cycle de vie par secteur d'activité. Si les études d'acquisition par secteur d'activité indiquent qu'une fonctionnalité ne peut être entièrement offerte ou si de légères modifications qui réduisent le coût ne changent pas considérablement les capacités fonctionnelles du système, le cycle recommence jusqu'à l'étape de la définition des caractéristiques de rendement. La simulation et la modélisation sont ensuite utilisées pendant toute l'étape de la conception et de la fabrication pour réduire la durée des cycles et le coût du processus. Enfin, un grand nombre des mêmes outils de simulation et de modélisation servent à la formation des opérateurs, des commandants et du personnel de soutien. Cette approche à plusieurs étapes présente des difficultés certaines en termes de facteurs humains, de logiciels et de conception technique d'intégration des systèmes, ainsi que sur le plan de l'informatique et de la psychologie.

Il faut investir dans la technologie pour parvenir à regrouper des milieux virtuels dispersés. La télésimulation interactive désigne le concept et le terme qu'utilise le département de la Défense des États-Unis pour décrire la norme mise au point pour l'utilisation des dispositifs de formation sur simulateur disséminés et leur regroupement en un milieu unique de formation virtuelle. L'architecture de haut niveau est le terme qui s'applique à la norme actuelle de télésimulation interactive.

5.8.2 Génération d'images

L'objectif général de ces technologies consiste à offrir à l'opérateur, en l'occurrence au pilote dans le cockpit, une vue améliorée du monde extérieur, dans le but de simuler une « vision claire », non obstruée par des données non requises et annotées automatiquement pour fournir des repères et des points de référence à valeur ajoutée.

La génération et la manipulation d'images perfectionnées sont considérées comme la clé de voûte des technologies de visualisation, car si l'on ne peut résoudre les problèmes de génération et de manipulation, les autres technologies de visualisation ne peuvent être mises au point. La génération et la manipulation des images pour le secteur de l'aérospatiale comprend les principaux domaines d'application suivants :

- l'acquisition et le prétraitement des images;
- le traitement et l'amélioration des images;
- le regroupement d'images provenant de plusieurs types de capteurs (radar thermique à balayage frontal, télévision bas niveau, système radar à ondes millimétriques, radar à antenne latérale synthétique);
- la synthèse et le rendu d'images (systèmes de vision synthétique et applications de conception technique comme la visualisation à l'aide du calcul de la dynamique des fluides).

La visualisation stéréoscopique ou tridimensionnelle est une technologie de visualisation et d'imagerie qui se trouve encore à l'étape de la recherche. Les techniques usuelles de génération d'images tridimensionnelles sur un écran à deux dimensions fait appel à des dispositifs électroniques et optiques, comme l'utilisation d'un oculaire spécial. Dans un système de visualisation tridimensionnel, les images sont cependant formées directement à partir de points lumineux répartis dans les trois dimensions spatiales. Au lieu des pixels, ce procédé de visualisation fait intervenir des voxels (pixels de volume). Il existe à l'heure actuelle un certain nombre de méthodes de visualisation tridimensionnelle, dont quelques-unes sont à base d'hologrammes et d'autres de nature mécanique. Le but recherché est d'obtenir une visualisation tridimensionnelle sans aucune pièce mobile, offrant une vision complète à 360 degrés n'exigeant le port d'aucun oculaire spécial.

5.8.3 Technologies de visualisation, y compris les casques à fibres optiques, la projection micro-laser et les panneaux plats

Les dispositifs de visualisation perfectionnés pour le cockpit se répartissent en deux catégories. Une catégorie regrouperait les tableaux de bord génériques à tête basse, comme les panneaux plats, les affichages multifonctions, les instruments électroniques de vol et les panneaux d'affichage correspondant à des instruments précis. L'autre catégorie comprendrait les systèmes de projection ou de superposition comme la visualisation tête haute, le visiocasque et les systèmes de vision améliorée et simulée. Un grand nombre de ces technologies de visualisation peuvent également servir à des applications utiles au sol pour la conception, la fabrication, la réparation et la révision des aéronefs, le visiocasque en étant une excellente illustration. Il est en effet possible d'utiliser ces casques dans de nombreuses applications de réalité virtuelle et de réalité amplifiée à des fins de conception technique au sol.

En règle générale, les aéronefs modernes (les aéronefs de combat militaires en sont les premiers utilisateurs) comprennent un ensemble complexe de matériel en avionique et les équipages doivent assimiler de grandes quantités d'information, et ce, souvent dans des conditions de très grand stress. Dans toute l'industrie aéronautique, on reconnaît maintenant le besoin d'améliorer les systèmes de visualisation et les interfaces opérateur-machine. Pour être opérationnels et bien réussir au plan commercial, les futurs aéronefs devront avoir à bord des systèmes de visualisation intégrés offrant une plus grande fonctionnalité. Il est impératif que la conception de ces technologies de visualisation aborde dès le début les difficultés que posent les aspects des facteurs humains et de l'interface homme-machine.

En ce qui concerne les applications tête basse pour le cockpit, les panneaux plats semblent percer sur le marché, la norme actuelle de l'industrie étant l'affichage à cristaux liquides à matrice active (ACLMA). Toutefois, d'autres technologies de visualisation à panneaux plats

présentent des possibilités intéressantes, comme l'affichage DEL (diode électroluminescente), l'écran àémission de champ, la visualisation numérique par projection sur micromiroir, ainsi que l'écran àplasma AC.

Il faut développer de nouvelles technologies de visualisation àpanneaux plats pour les aéronefs militaires et commerciaux modernes, la visualisation àpanneau plat multifonctions étant en voie de devenir la norme. L'ACLMA est la norme actuelle, alors que d'autres technologies de visualisation àpanneaux plats sont mises au point. Mentionnons entre autres l'affichage DEL (diode électroluminescente), l'écran àémission de champ, la visualisation numérique par projection sur micromiroir, ainsi que l'écran àplasma AC. Le secteur a besoin de technologies qui permettront d'agrandir la taille et d'améliorer la fidélité de restitution visuelle de l'affichage, tout en réduisant les coûts et la complexité.

Pour ce qui est des applications militaires, la visualisation tête haute a remplacé les collimateurs de tir conventionnels et on la retrouve habituellement dans tous les aéronefs de combat modernes à voilure fixe. La tendance récente dans les perfectionnements de la technologie a porté sur l'élargissement du champ de vision instantané total, capable d'offrir une capacité àbalayage cavalier/TV et de soutenir les détecteurs optroniques et les systèmes d'armes. La visualisation tête haute (HUD) commence également àfaire son apparition dans les giravions de combat et dans certains avions àréaction commerciaux. Le champ de vision limité et la possibilité de décalage du collimateur sont toujours problématiques, et il en va de même du fouillis des symboles utilisés et de l'obscurité générale des dispositifs de visualisation tête haute. La visualisation tête haute peut être envisagée comme solution à court terme pour la plupart des applications. En effet, dès que les problèmes actuels seront résolus en ce qui concerne les visiocasques, il est prévu que ces dispositifs remplaceront ceux de la visualisation tête haute dans la presque totalité des applications.

Les visiocasques ont d'abord été utilisés dans les giravions de combat et ils sont encore plus présents dans ce type d'appareils que sur les aéronefs à voilure fixe. Tandis que cette technologie atteindra sa maturité, il devrait y avoir une augmentation phénoménale du nombre de visiocasques dans les cockpits d'aéronef. Actuellement, les applications sont confinées à l'affichage des données de détection optronique, de collimateurs de tir et de certains types de symbologie d'instruments de vol.

5.8.4 Environnements et concepts perfectionnés de formation en simulation

Il est possible de subdiviser ce créneau technologique dans de nouvelles technologies requises pour la conception et la fabrication, ainsi que dans les technologies se rapportant surtout àdes besoins opérationnels militaires. Le premier groupe de technologies est principalement abordé sous la rubrique des technologies SMART et des technologies de fabrication de pointe, tandis que les contextes de formation en simulation pour les besoins militaires sont abordés ci-après.

Les activités de simulation militaires peuvent être réparties dans les trois catégories suivantes :

- la simulation constructive – ce type de simulation repose sur l'emploi de personnel et de matériel de simulation;
- la simulation en réalité virtuelle – ce type de simulation repose sur l'emploi de vraies personnes qui utilisent du matériel de simulation;

- la simulation en conditions réelles – ce type de simulation fait intervenir de vraies personnes qui utilisent du matériel réel.

Dans le passé, la simulation reposait essentiellement sur un dispositif de simulation unique qui permettait l'évaluation opérationnelle d'un système d'arme unique, ou encore la formation en isolation virtuelle de facteurs extérieurs. Les progrès rapides survenus en matière de puissance informatique et le développement d'outils de simulation ont suscité la possibilité d'un regroupement beaucoup plus élargi des simulations, l'élargissement des concepts simulés, voire même la combinaison possible de systèmes réels et simulés en un seul contexte de simulation ou une seule technique d'évaluation de concept.

Il faut développer des outils technologiques et investir dans les domaines ci-après.

- Réduction des coûts – Il faut réduire le coût des divers modules exigés pour une installation de formation en simulation, tandis que seront accrues la facilité d'utilisation, de réutilisation et la fiabilité.
- Normes d'interface – Il faut développer une architecture ouverte et des normes communes pour la télésimulation interactive, et permettre le regroupement d'installations de simulation dispersés en plusieurs lieux.
- Facteurs humains – Il faut développer et valider des modèles améliorés de rendement humain, et offrir une capacité de reproduction des types de personnalité, d'évaluation de la fatigue et d'adaptation du niveau de formation.
- Techniques d'évaluation de concept – Il faut concevoir et valider des équipements de simulation de plus grande envergure. Les technologies qui permettent un élargissement du contexte de simulation doivent aller de pair avec la capacité de concevoir des exercices de simulation qui exploreront correctement les systèmes d'objectifs, pour ensuite analyser et comprendre les résultats de ces exercices opérationnels en simulation àgrande échelle.

5.8.5 Outils de base de données

Les outils de base de données désignent les techniques qui concernent la conception et l'accès des bases de données qui contiennent de l'information précise sur les besoins en simulation et en modélisation. Il s'agit d'un domaine où les technologies de l'information sont très utilisées et pour lequel les défis ne manquent pas pour concevoir les outils requis par le secteur comme des bases de données visuelles ou la télésimulation interactive.

Les bases de données en simulation aérospatiale sont en règle générale de très forte taille et exigent une puissance informatique à la fine pointe de la technologie, aux fins du développement et de l'exploitation des contextes de simulation. Il faut par ailleurs élaborer des normes communes de base de données et créer des bases de données validées pour les contextes et les systèmes de simulation.

5.9 Technologies de fabrication de pointe

La technologie essentielle des technologies de fabrication de pointe comprennent de nombreux volets qui se rapporte au développement de procédés de conception abordables à faibles risques, au développement et à la production connexes. Les volets technologiques retenus pour ce créneau proviennent de la Carte routière technologique CFRR.

Les volets technologiques de la technologie essentielle des technologies de fabrication de pointe sont décrits ci-après.

5.9.1 Technologies de l'information pour les procédés de fabrication

Les technologies de l'information auront la plus grande incidence sur les techniques de fabrication, peu importe le créneau technologique concerné. La présente section du cadre technologique traite des questions soulevées dans la Carte routière technologique CFRR, mais s'inspire très largement de l'approche et des documents du projet de carte routière des technologies de fabrication intégrée entrepris aux États-Unis. Le secteur canadien de l'aérospatiale et de la défense a légèrement progressé sur la voie de l'adoption de technologies de l'information dans la fabrication. Il faut investir considérablement et fournir un soutien massif dans ce domaine, surtout pour appuyer la participation pertinente et efficace àtous les niveaux des entreprises. La section ci-après comprend une définition des trois volets technologiques particulièrement pertinents en technologie de l'information de la carte routière des technologies de fabrication intégrée, dans la perspective du cadre technologique de PTC.

Procédés informatiques des fabricants

Ce volet technologique comprend les éléments suivants :

- Conception, définition et échange de données sur les produits – Ce volet couvre un sujet déjàabordé dans le document, sous la rubrique de l'échange de données sur les produits et de données techniques, ainsi que sous celle de la conception technique et virtuelle simultanée. Les efforts portent principalement sur la conception en collaboration et les questions connexes soulevées par la gestion de la configuration.
- Planification et exécution de la fabrication – Cette technologie vise en grande partie les questions de technique de fabrication et de planification des ressources de l'entreprise.
- Gestion des ressources de l'entreprise – Ce volet porte sur la gestion des relations avec la clientèle et les questions d'intégration des procédés de la chaîne d'approvisionnement.
- Infrastructure habilitante – Ce volet traite des questions aux niveaux microsectoriel et national. Au Canada, l'intérêt porte surtout sur les besoins en infrastructure nationale pour les questions d'échange de données et d'exigences de large bande de réseau. D'excellents travaux ont été réalisés dans ces deux domaines, qu'a vivement soutenu et encouragé Industrie Canada.

Modélisation et simulation pour les fabricants

Ce volet est aussi abordé sous la rubrique de la conception technique et virtuelle simultanée, de même qu'il relève de la simulation et de la modélisation pour l'acquisition (mission), les exercices et la formation (SMART). Il touche àtoutes les questions de simulation et de modélisation des activités de fabrication, comme la modélisation et la simulation des performances physiques du produit et du cycle de vie, les procédés de fabrication, ainsi que la modélisation et la simulation àdes fins commerciales.

Commandes intelligentes

Ce volet technologique porte sur les questions de commande de procédé et comprend les éléments suivants : l'interface homme-machine et machine-machine, et la réalisation des techniques d'usinage intelligent. Il s'agit d'un créneau important pour la réduction des coûts sur tous les plans – le plan humain, le plan mécanique et le plan des matériaux.

5.9.2 Techniques de coulée

En règle générale, les fournisseurs canadiens de moules dépendent des sous-traitants américains ou des fabricants de matériel d'origine pour les procédés de moulage perfectionnés. Il y a dans l'ensemble un manque d'aides informatiques et de compétences pour mettre àprofit ces technologies. Il y aura sans doute des améliorations et des ajouts qualitatifs aux techniques de coulée dans l'avenir, mais ce créneau ne devrait pas connaître de développement révolutionnaire.

Les considérations ci-après peuvent être nuancées afin de rendre compte des dernières améliorations qui permettent le moulage en une seule pièce de composants de cellule de grande taille, comme des montants complets de porte et les accessoires àproximité, ce qui entraîne des économies importantes et une réduction appréciable du poids, compte tenu du nombre moins élevé de pièces. La certification et l'inspection du contrôle de la qualité exigent un travail de développement plus poussé.

Nous présentons ci-après quelques-unes des techniques de coulée les plus courantes.

Moulage sous pression – Cette technique de fabrication vise la production de pièces métalliques aux dimensions très précises, bien définies et dont la surface est lisse ou poreuse. Elle consiste àforcer du métal fondu sous haute pression dans un moule métallique réutilisable. L'expression « moulage sous pression » sert aussi àdécrire la pièce produite, et l'expression « moulage sous pression par gravité » désigne les pièces moulées àpartir de moules métalliques et obtenues à l'aide de masselottes àpesanteur. Aux États -Unis et au Canada, ce procédé est connu sous le nom de moulage permanent. Ce que nous nommons ici « moulage sous pression » est désigné comme « coulée sous pression » en Europe.

Moulage par centrifugation – Il s'agit d'un moulage obtenu à l'aide de moules rotatifs, de manière àexercer un effet centrifuge sur le matériau de moulage.

Moulage au sable – Il s'agit de la méthode fondamentale de moulage des métaux ferreux et de nombreux métaux non ferreux. Un moule est disposé dans un lit de sable spécialement traité. Il est ensuite retiré et le sable est cuit, puis le métal fondu est versé dans la cavité ainsi créée.

Moulage de précision – Par ce procédé, le métal fondu est transformé en une seule opération en une pièce d'une grande précision technique, le tout s'accompagnant d'une perte minimale de matériau et d'énergie et d'une réduction correspondante en travail d'usinage ultérieur. Cette technique présente une polyvalence égalée par très peu d'autres procédés de formage du métal. Il est possible d'y incorporer des formes complexes et rentrantes. Il y a donc une plus grande liberté de conception par ce procédé. La polyvalence de la technique s'entend également des matériaux àutiliser, car pratiquement tous les types d'alliage peuvent se prêter au moulage de précision. Ce procédé se distingue surtout par sa capacité d'utilisation àcire perdue. Un moule métallique sert habituellement àdonner la forme voulue au modèle de la pièce, maintenant presque toujours en cire. Ces moules à injection sont généralement

fabriqués en duralumin ou en laiton. Un noyau préformé en céramique ou soluble dans l'eau peut être utilisé pour former des cavités précises à l'intérieur de la pièce et le noyau serait alors incorporé dans le moule de cire avant l'injection proprement dite. Les modèles peuvent être installés sur un système de canal de coulée afin de préparer une pièce à l'application ultérieure d'un revêtement de matériau aux propriétés réfractaires.

5.9.3 Métallurgie des poudres

La métallurgie des poudres est une méthode utilisée pour la fabrication de pièces fiables en métal ferreux et non ferreux. Les pièces fabriquées par ce procédé sont obtenues par le mélange de poudres élémentaires et d'alliage, le compactage du mélange dans un moule, puis le frittage ou le chauffage des formes réalisées dans un four àatmosphère contrôlée, cette dernière opération étant destinée à lier les particules métallurgiques. Il s'agit essentiellement d'une technique de métallurgie sans « grenaillage ». La métallurgie des poudres incorpore plus de 97 p. 100 de la matière première initiale dans la pièce produite. En raison de cet avantage, il s'agit d'un procédé efficace au plan énergétique et économique dans la consommation des matériaux.

La métallurgie des poudres est aussi économique pour la production de pièces simples ou complexes, dont les dimensions sont identiques ou presque identiques aux dimensions recherchées et ce, àune cadence de production qui peut varier entre quelques centaines et quelques milliers de pièces à l'heure. Selon cette technique, il y a très peu d'usinage requis, voire aucun. Il est également possible de former les pièces aux bonnes dimensions pour respecter davantage la taille voulue, ou encore de les fabriquer dans le but de leur conférer une plus grande densité et une plus grande résistance.

5.9.4 Assemblage de tous les types de métaux

Cette technologie comprend les principaux objectifs suivants :

- facilité de fabrication accrue;
- points de soudure moins nombreux, mais de plus grande qualité;
- réduction du poids et nombre minimal de pièces;
- capacité de tirer profit de propriétés dissemblables de matériaux différents;
- réparation des pièces jusqu'àun état presque neuf.

L'assemblage regroupe les principales catégories suivantes :

- assemblage à l'état liquide – une partie de l'assemblage devient entièrement liquide pendant l'opération (soudure conventionnelle);
- assemblage à l'état solide – aucune des deux parties ne devient entièrement liquide pendant l'opération (compression isostatique àchaud);
- collage par assemblage en phase liquide transitoire (TLP) – une partie de l'assemblage atteint un point qui se situe entre les températures de l'état solide et de l'état liquide (collage par assemblage en phase liquide transitoire et soudure par agitation);
- collage – un composé de traitement est introduit dans l'assemblage pour coller les deux pièces (par exemple, collage à la résine époxy).

Soudure par agitation – La soudure par agitation est une nouvelle technologie, en vertu de laquelle une machine-outil fait tourner une cheville pour produire de la chaleur par friction en un point précis, sur un assemblage bout àbout. Les matériaux des deux côtés fusionnent et des points de soudure de haute qualité sont produits. Cette technologie exige encore beaucoup d'efforts de développement pour en permettre l'application dans les composants de l'aérospatiale.

Les principes théoriques de ces diverses techniques sont assez bien compris. Toutefois, il faut encore beaucoup de travail de développement sur les procédés précis exigés pour produire des composants exploitables à l'aide de nouveaux matériaux ayant des propriétés de résistance structurale et de résistance àchaud élevées.

5.9.5 Systèmes et procédés de revêtement

Les procédés de revêtement ont de nombreuses applications dans l'industrie aéronautique.

- Ils améliorent la durabilité, la fiabilité et les performances de divers composants.
- Ils résistent à l'érosion et à l'usure de glissement et de contact, et ils permettent d'améliorer la qualité des surfaces.
- Ils permettent l'application de revêtements anticorrosion pour combattre la piqûre, l'exfoliation, l'oxydation et la corrosion thermique.

Voici une brève description de divers procédés de revêtement.

Dépôt par vapeur physique – Il s'agit d'un enduit de faible épaisseur sur un matériau pour lui conférer une résistance à l'usure, le protéger contre la corrosion ou améliorer les propriétés lubrifiantes des surfaces. Un enduit de métal pur peut être apposé, mais la plupart des revêtements se composent de carbure et de nitrure de grande dureté et densité. Le procédé fait intervenir le nettoyage soigneux de la pièce, qui est ensuite disposée dans une chambre sous vide et chauffée (habituellement entre 350 et 400 °C). La pièce est enduite d'un flot de particules qui proviennent du matériau de revêtement, c'est-à-dire la « cible ». Il s'agit d'un procédé « àportée visuelle » et les pièces sont souvent tournées dans la chambre afin de garantir un revêtement uniforme optimal. Le dépôt par vapeur physique produit généralement une couche de revêtement dure, dense et uniforme.

Dépôt par vapeur chimique – Cette technique sert àproduire un revêtement de surface dur et résistant à l'eau pour les outils et les pièces d'usure. La différence entre le procédé Plasma CVD et le procédé traditionnel de dépôt par vapeur chimique tient surtout à l'écart de température entre les deux méthodes, de l'ordre d'environ 500 °C, la méthode conventionnelle de dépôt par vapeur chimique étant réalisée àune température située entre 1 000 et 1 100 °C. Un revêtement appliqué à l'aide du procédé Plasma CVD s'ajoute au revêtement de dépôt par vapeur physique et lui sert de complément. Un enduit de Plasma CVD peut servir là où un revêtement de dépôt par vapeur physique a été appliqué sur des outils et des éléments de machine dans le but d'en améliorer la résistance contre la friction, la corrosion et l'usure, ce qui prolonge la durée de vie utile et la productivité des outils de production. Comparativement au procédé de dépôt par vapeur physique, la technique Plasma CVD offre de meilleures possibilités de revêtement sur les pièces aux formes géométriques plus complexes.

Pulvérisation de plasma – Il est possible de procéder àun placage de divers métaux, de carbures et de céramiques par la pulvérisation de plasma. Ces revêtements sont appliqués

pour la protection contre la corrosion, la remise en état d'une pièce et la correction d'imperfections d'usinage. Les revêtements de céramique offrent une résistance contre l'usure et une isolation des conducteurs électriques, en plus d'agir comme barrières thermiques. Les revêtements au carbure protègent le substrat contre l'usure et l'abrasion. La métallisation àchaud consiste àplacer un matériau dans une source de chaleur, à le fondre, puis à l'accélérer en direction d'une pièce ciblée. Dans la pulvérisation de plasma, la matière première est une fine poudre et la flamme de plasma est à la fois la source de chaleur et l'accélérateur. La flamme de plasma est créée par la traversée d'un gaz inerte dans un arc électrique, au moyen d'un appareil qui ressemble àun pistolet. Ce que l'on désigne comme plasma est constitué au moment où les atomes de gaz inerte sont dépouillés par l'arc électrique de leurs électrons. Lorsque le plasma sort du pistolet, les électrons se regroupent avec les atomes de gaz et une quantité énorme d'énergie est alors libérée. Cette énergie crée la flamme de plasma, qui brûle àdes températures pouvant atteindre 13 000 °C, tandis que la vitesse de pulvérisation avoisine Mach 2. Dans ces conditions, la pulvérisation de plasma peut déposer un très large éventail de matériaux. La résistance de l'adhésion et l'intégrité du revêtement sont optimaux, alors que la porosité et les insertions d'agents oxydants sont minimisées.

Implantation ionique – Ce procédé consiste àbombarder la surface d'un matériau d'ions àde très hauts niveaux d'énergie. La technique provient de l'industrie de l'électronique, où il faut modifier les propriétés du matériau àune échelle infinitésimale. En bref, des atomes sont insérés dans le réseau atomique du matériau qui subit la modification dans le but d'en accroître la résistance à l'usure, la dureté, etc. Au cours de l'implantation, la température peut être aussi basse que 180 °C et le procédé peut viser des outils ou des composants finis, par exemple des surfaces durcies, trempées, polies ou les trois types de finition. L'implantation ionique n'est pas un revêtement et ne s'accompagne donc d'aucun écaillage, de même qu'il n'y aura aucun effet sur la finition de surface. Un autre avantage du procédé tient à la conservation des tolérances dimensionnelles pendant toute l'opération.

Placage de chrome dur – Le chrome industriel ou chrome dur désigne un épais placage de chrome par électrodéposition (entre 0,1 et 60 mils) utilisé àdes fins de conception technique. Il se distingue ainsi du chrome décoratif, qui est généralement plutôt mince (entre 0,005 et 0,050 mils). Ce dernier type de chrome sert surtout àdes fins cosmétiques et il est souvent appliqué sur du nickel. Le chrome industriel plaqué par électrodéposition est un revêtement extrêmement dur qui sert àde nombreuses applications où il y a des taux de friction très élevés, et où il faut une excellente résistance à l'usure et à l'abrasion. Après avoir été chauffé à400 °C, le chrome conserve sa dureté. Sa résistance à la corrosion dans des conditions d'oxydation est excellente. Le placage de chrome dur est très utilisé dans l'industrie aérospatiale et il est considéré comme un procédé qui nuit à l'environnement. Des efforts importants sont déployés depuis un certain temps pour trouver un procédé de placage qui soit plus écologique.

Anodisation – L'application d'une couche dure par anodisation est le procédé électrochimique utilisé pour produire une couche d'oxyde d'aluminium extrêmement dure, dense et résistante à l'usure. L'anodisation améliore les propriétés de l'aluminium et en modifie les caractéristiques de base comme la résistance diélectrique, le caractère lubrifiant et la coloration.

Procédé à l'oxygène et au gaz combustible àgrande vitesse (HVOF) – Le dispositif HVOF fait intervenir un mélange d'oxygène et de gaz combustible composé de propylène, de

propane ou d'hydrogène, selon les besoins de revêtement des utilisateurs, dans le but de produire un revêtement dur et dense ayant une porosité négligeable et une résistance de liaison très élevée. Les gaz combustibles sont mélangés sur la partie avant du pistolet HVOF, puis sont éjectés du canon et allumés à l'extérieur du pistolet. Les gaz allumés forment une flamme circulaire qui entoure le matériau sous forme de poudre s'écoulant àtravers le pistolet. La température de combustion se situe entre 5 000 °F à6 000 °F, selon le combustible utilisé. La flamme circulaire forme le jet de poudre et produit un chauffage, un point de fusion et une accélération uniformes.

5.9.6 Techniques de fabrication au laser

Dans l'ensemble, les techniques de fabrication au laser peuvent se regrouper en trois catégories : la fabrication au laser proprement dite (perçage, coupe et ébarbage, soudure, micro-usinage); modification des surfaces au laser (trempe par onde de choc, surfaçage, alliage, glaçage, durcissement par transformation, dépôt par vapeur physique (PVD) au laser; et formage au laser (refabrication, déformation de forme libre).

Fabrication au laser

À l'heure actuelle, le laser sert au perçage de petits trous àgrand allongement, àdes orifices de refroidissement angulaire àfaible flux pour les composants de moteurs àturbine àgaz en acier inoxydable, en alliages de cobalt, de nickel et de titane.

La coupe et l'ébarbage et la soudure au laser sont largement utilisés dans l'industrie automobile, dans le cadre du concept de production juste àtemps. Dans l'industrie aéronautique, l'emploi de ces procédés devrait s'accroître au cours des prochaines années.

En raison de la grande précision du procédé et de la distorsion minimale qu'il permet, la soudure au laser peut servir à l'assemblage des composants métalliques formés qui ont une configuration complexe (collecteurs de moteur, carénage d'aéronef, etc.) et des composants préusinés. La soudure au laser offre également d'importantes possibilités pour la soudure de métaux dissemblables. On l'évalue aussi pour la soudure de grands composants de cellules d'aéronef, y compris l'enveloppe de fuselage.

Modification des surfaces au laser

La modification des surfaces au laser présente d'importantes possibilités pour des applications précises dans l'industrie aéronautique. Ainsi, la trempe par onde de choc peut produire un effort de compression résiduel dans les surfaces d'alliages au nickel, à l'aluminium et au titane, ainsi qu'une surface beaucoup plus lisse que celle créée par le procédé qui utilise le grenaillage de précontrainte. Cette technique améliore sensiblement la résistance à la fatigue et la durée de vie en fatigue selon l'usure de contact.

Le surfaçage au laser présente certains avantages comparativement à la pulvérisation de plasma (plus grande précision du jet, revêtement vraiment dense et adhésion métallurgique au substrat), sans compter qu'il peut servir àproduire des revêtements offrant une résistance thermique et une résistance à la corrosion, à l'oxydation et à l'usure, tout particulièrement pour les composants de moteur et de train d'atterrissage.

Le durcissage par transformation au laser peut améliorer la résistance à l'usure et à la fatigue pour les aciers et les métaux ferreux (comme les composants de train d'atterrissage). Ses applications sont toutefois limitées du fait que les aciers et les métaux ferreux durcis ne sont pas très employés dans l'industrie aéronautique.

5.9.7 Matériaux composites à fibres

Les matériaux composites àfibres comprennent les matériaux àfibres sèches (généralement du carbone, de l'aramide ou du verre sous forme de stratifil unidirectionnel, de tissu ou encore d'armure muldirectionnelle) qui sont imprégnés de résines, moulés dans la forme voulue, puis soumis à une polymérisation. Par rapport à la fabrication métallique, ces matériaux offrent un poids structural moindre et ont une résistance nominale plus grande aux contraintes, tandis que les innovations techniques ont rendu possible l'adaptation de leurs propriétés. La plupart des composants d'aéronef en matériaux composites sont faits de matériaux en partie polymérisés et préimprégnés qui sont réfrigérés jusqu'à leur utilisation, et qui exigent de grandes pressions de compactage et des températures de polymérisation élevées.

Les matériaux préimprégnés produits juste àtemps conviennent aux petits aéronefs, dans lesquels les contraintes ne sont pas élevées. Ces matériaux diffèrent des matériaux préimprégnés conventionnels dans la mesure où les fibres sont imprégnées juste avant leur mise en moule. Les matériaux juste àtemps sont plus économiques, n'exigent pas d'entreposage frigorifique et peuvent être polymérisés àune pression et àune température plus basses, tandis que les moules et les machines-outils utilisés pour leur fabrication sont moins coûteux. Pour les performances élevées sur les gros aéronefs, le moulage par transfert de résine fait intervenir la mise en moule de matériaux secs dans des moules appareillés; il s'agit donc d'une méthode plus économique en termes de matériaux que le procédé à matériaux préimprégnés. Les améliorations constantes dans les procédés de brochage d'ensembles de tissus secs permettent d'accroître la résistance des couches intermédiaires aux dommages d'impact, en plus de promettre des économies importantes en matière de coûts globaux de cycle de vie, eu égard aux performances associées à la réduction du poids.

L'emploi de structures composites dans les aéronefs civils est actuellement freiné par l'incapacité àtirer pleinement profit des propriétés de ces matériaux, ce qui fait en sorte que les structures métalliques conservent toujours un avantage concurrentiel par rapport aux composites. Pour chaque matériau utilisé dans la construction aéronautique, le niveau maximal de contrainte admissible pour la conception dépend de la capacité statistique du procédé de fabrication, des facteurs d'élimination s'appliquant dans des conditions àchaud et àfroid, et de la résistance résiduelle après impact. La « résistance nominale admise » est la valeur de confiance attribuée àun certain pourcentage des matériaux (généralement 95 p. 100 ou 99 p. 100) appelés àdépasser cette confiance dans une mesure de 95 p. 100. Les fabricants sont tenus de réaliser de nombreux essais pour établir la résistance admissible de chaque matériau et du procédé de fabrication. À l'heure actuelle, il n'est pas possible de mettre à contribution toutes les capacités des matériaux, compte tenu de la variabilité des procédés et des possibilités de destruction causée par les effets de l'environnement et les dommages provoqués par un impact.

5.9.8 Usinage ultrarapide

L'usinage ultrarapide désigne des broches qui tournent àdes vitesses et àdes taux d'avance qui sont de 5 à10 fois plus rapides que la vitesse et les taux usuels. Le temps d'usinage s'en trouve réduit d'autant, ce qui diminue le coût de l'usinage et laisse plus de temps pour la fabrication. Ces résultats sont possibles grâce aux avantages suivants :

- des vitesses de broches supérieures – 50 000 rpm ou plus, comparativement à 3 000 rpm, à l'heure actuelle;
- des taux d'avance plus efficaces – pour l'instant, ils se situent à environ 200 pouces la minute (ipm), soit une augmentation de 1 200 ipm;
- une accélération et une décélération largement améliorées de la pièce de travail ou de la tête de coupe – elles se situent actuellement à 0,1 g et elles s'établissent maintenant à 1 ou 2 g; et
- des commandes informatiques « d'anticipation » – elles permettront à la machine d'éviter les mouvements perdus d'une pièce de travail, ce qui préviendra les dommages ultérieurs qui pourraient en résulter sur la machine ou la pièce.

Les taux d'élagage du métal largement supérieurs et ces vitesses d'usinage plus rapides permettent aux ingénieurs d'études de produire de nouvelles pièces en seul tenant et de réduire ainsi le nombre total de pièces (surtout les fixations), d'éliminer les besoins d'assemblage, et de réduire le poids, l'usure de contact et la corrosion. Ces avantages exigent une nouvelle attitude en conception qui tienne compte des capacités de cette technique de fabrication innovatrice.

5.9.9 Formage avancé des métaux

La Carte routière technologique CFRR donne une définition de deux types de procédés de formage des métaux et les désigne comme des créneaux qui méritent l'intérêt du secteur canadien de l'aérospatiale : il s'agit en l'occurrence du formage des métaux à froid et du forgeage.

Il est possible d'analyser les méthodes de formage à froid à l'aide des logiciels d'analyse des éléments finis offerts sur le marché et de nature générique. Ces méthodes ne sont pas très utilisées, notamment parce qu'elles exigent beaucoup de calculs. La plupart des travaux de formage à froid effectués au Canada se fondent sur les compétences de l'opérateur plutôt que sur les outils informatiques. Il y a une grande compétence dans le formage de feuilles de métal, dans l'industrie automobile, et le secteur de l'aérospatiale a mis largement à profit cette assise industrielle. Les matériaux perfectionnés ou les formes complexes qui exigent des outils de soutien analytique seront de plus en plus en demande aux fins de l'échange future des données sur les produits. Il faut acquérir de nombreuses compétences dans l'emploi des outils analytiques, et être en mesure d'utiliser les techniques de formage avancées, comme le formage par explosion ou l'hydroformage.

Le secteur du forgeage est de taille modeste et porte principalement sur besoins technologiques primaires de l'industrie automobile. La technique de fabrication du forgeage consiste à déformer un métal à l'aide de ses propriétés plastiques et d'une grande pression et à produire des pièces à grande résistance, soit des pièces forgées. En règle générale, ce procédé fait intervenir le préchauffage du métal, jusqu'à ce qu'une température donnée soit atteinte. Le forgeage isothermique désigne le procédé au cours duquel la température de la pièce de travail demeure à une température constante. Cette dernière méthode sert principalement au forgeage de pièces minces aux formes complexes à partir de l' aluminium, du nickel, du titane et de superalliages.

5.9.10 Formage près de la cote désirée

Le formage près de la cote désirée revêt un intérêt particulier pour les formes complexes où le matériau est soit très onéreux dans sa forme non traitée, soit très difficile à former et à réduire à la forme finale recherchée. Cette observation vaut surtout pour les céramiques, les superalliages, les composites à matrice céramique et les composites à matrice métallique. Dans ce dernier cas, le formage doit faire en sorte que le matériau de renfort utilisé est bien réparti et orienté. La technique du formage près de la cote désirée met généralement à contribution des poudres métalliques, céramiques et polymériques ainsi que des matériaux composites connexes. On s'en sert pour le formage de pièces de grande valeur, pour lesquelles le formage exigeait auparavant de nombreuses étapes d'usinage de finition.

5.9.11 Contrôle des procédés intelligents

Le contrôle des procédés intelligents peut servir à tous les procédés de fabrication assistée par ordinateur, comme le fraisage multiaxial, le traitement au laser, la soudure conventionnelle, la projection de particules et le martelage, la peinture, le meulage et la production rapide de prototype. Les percées en conception et fabrication assistées par ordinateur et en systèmes de contrôle de mouvement ont éliminé certains des problèmes de précision pour la fabrication de composants complexes du secteur de l'aérospatiale. Aujourd'hui, la capacité des procédés est le principal facteur servant à définir la qualité et le coût des pièces produites. En ce qui concerne le fraisage, des problèmes comme la déflexion et les vibrations des pièces et des machines-outils, l'usure et l'écaillage des outils ainsi que la température de coupe sont surtout réglés par des méthodes appliquées hors de la ligne de production, selon l'expérience du programmeur. Il s'ensuit une régulation qui n'est pas optimale de la part du contrôleur de la machine, laquelle exige alors toute l'attention de l'opérateur. La régulation des procédés intelligents devrait donc à la fois porter sur la qualité des pièces produites (respect des dimensions, qualité de la finition de surface, etc.) et sur le coût (cycles de production, coût de la coupe, etc.). Idéalement, cet objectif peut être atteint par l'emploi de modèles de procédé précis et de données de détection dans un environnement de contrôle à architecture ouverte.

La mise en application du contrôle de procédés intelligents exige le développement et l'intégration d'une variété de technologies connexes. En plus des modèles de procédé décrits ci-avant, il faut développer des outils de contrôle actif, des détecteurs liés à des procédés précis, des algorithmes de commande, une technologie de surveillance de l'état, et des régulateurs de machine.

5.9.12 Composites à matrice métallique

Au nombre des trois types de composites à matrice métallique utilisés ou dont l'utilisation est envisagée pour des applications techniques générales, il y a les composites à matrice métallique (CMM) renforcés à particules, les CMM filiformes renforcés, et les CMM renforcés à fibres. La plupart des composants fabriqués à l'aide de CMM renforcés à particules le sont à l'aide d'un moulage de CMM. Bien que le moulage de composants en CMM renforcés à particules gagne en popularité pour la conception technique des produits de consommation, leur emploi n'est envisagé par les avionneurs que pour les applications non névralgiques, en raison notamment de leur faible résistance à la fatigue. Les CMM renforcés filiformes et à courtes fibres en sont encore à l'étape de la mise au point; ils offrent de meilleures propriétés que les CMM renforcés à particules et ce sont les seuls CMM dont l'emploi est actuellement envisagé par les avionneurs.

5.9.13 Composites à matrice céramique

Les composites à matrice céramique (CMC) offrent une ténacité et des propriétés de déformation avant la défaillance beaucoup plus grandes que celles offertes par les céramiques monolithiques. Ces qualités en atténuent les principales limites d'utilisation qui entravaient l'emploi des céramiques dans des applications structurales de grande contrainte.

Il y a deux types de composites à matrice céramique : les CMC àrenfort discontinus et les CMC àrenfort continu. Les CMC àrenfort discontin u se composent d'un matériau matriciel (en règle générale, il s'agit d'alumine, de nitrure de silicium, de carbure de silicium ou de zircone), auquel un renfort (par exemple, des barbes, des lamelles ou des particules de carbure de silicium) est ajouté. Les CMC àrenfort discontinu servent principalement aux pièces d'usure (comme les guides de soupape et les paliers), aux outils de coupe pour l'usinage des composants de l'aérospatiale en alliage (à haute teneur en nickel), ainsi qu'aux matrices àblindage et àextrusion pour les aéronefs et les véhicules terrestres.

5.10 Technologies d'entretien, de réparation et de révision

La Carte routière technologique CFRR traite de deux volets principaux dans le domaine de la technologie essentielle relative à l'entretien, à la réparation et à la révision des aéronefs. Le premier volet porte sur les techniques exigées pour établir s'il y a lieu de procéder àune réparation ou àun réusinage. Pour ce faire, il faut quantifier les défauts et évaluer la vie utile résiduelle sécuritaire. Ces techniques et ces procédés technologiques comprennent des éléments comme la surveillance de l'état et de l'usage du matériel ou l'évaluation non destructive des composants, là où ces techniques sont accessibles. Le deuxième volet se rapporte aux technologies exigées pour effectuer une réparation ou un réusinage et porte sur un composant retourné afin qu'il soit entretenu ou traité dans le but de prévenir l'accumulation d'autres dommages. Un des aspects primordiaux des technologies d'entretien, de réparation et de révision tient àce que la réparation effectuée produise des composants sûrs qui ne mettent pas en péril la navigabilité de l'aéronef. Tel pourrait être le cas d'un rotor endommagé àpales entièrement en titane, ou Blisk ©. Il s'agit d'un composant onéreux et souvent endommagé par un corps étranger. Bien qu'il ne soit pas possible de souder une nouvelle pale ou une partie d'une nouvelle pale, il faut de l'information sur les performances techniques d'origine ou faire appel à l'ingénierie inverse pour connaître les matériaux àcycle de fatigue court, etc. Par ailleurs, il faut consacrer beaucoup d'efforts au développement d'un programme de réparation et élaborer un protocole de nouvelle certification qui comprendra des essais sur mesure, à la pièce et des bancs d'essai complet sur le moteur.

Les volets technologiques de la technologie essentielle de l'entretien, de la réparation et de la révision des aéronefs sont décrits ci-après.

5.10.1 Technologies de réparation des turbines à gaz

La réparation et la nouvelle certification de structures de turbine àgaz exigent toutes les compétences techniques initiales, sauf que la situation est quelque peu compliquée du fait des propriétés détériorées des matériaux et du travail d'ingénierie inverse qui s'impose. La section qui suit traite des principales compétences exigées pour la réparation ou le réusinage d'un moteur aéronautique. Par le passé, les fabricants de moteurs àturbine àgaz ont obtenu une marge bénéficiaire intéressante sur la vente de pièces de rechange. Les fabricants de

matériel d'origine détiennent les renseignements techniques et contrôlent ainsi la certification de navigabilité et les données connexes d'essai pour leurs moteurs et leurs pièces. Il y a une tendance très nette à la réduction des coûts de propriété des systèmes de propulsion aéronautique et les grands utilisateurs, en particuliers les militaires, explorent de plus en plus la possibilité de réparer les composants, même pour les pièces mobiles essentielles au vol. Des compétences sont exigées dans les domaines suivants :

- Technologies de surveillance de l'état et de l'usage du matériel – Il faut connaître l'état des dommages des composants et le degré d'accumulation des dommages avant de pouvoir prendre une décision sur la réparation d'un composant en particulier. L'installation de dispositifs de suivi d'usure et de durée de vie sur la plupart des groupes moteur aéronautiques modernes permet d'obtenir l'essentiel de l'information requise. Il faut cependant une capacité d'analyse pour établir une corrélation entre l'étendue des dommages et les paramètres techniques de conception.
- Analyse des modes de pannes, de leurs effets et de leur criticité (AMPEC) – La probabilité de défaillance d'un composant et les conséquences de cette défaillance détermineront le caractère souhaitable d'une réparation, de même qu'elles dicteront les exigences connexes de certification de la réparation.
- Certification – Si une entreprise autre que le fabricant de matériel d'origine effectue une réparation, elle doit avoir les compétences voulues en ce qui a trait à la capacité d'analyse, aux installations, au travail de conception reconnu et aux compétences du personnel.
- Technologies métallurgiques – Les difficultés au plan métallurgique d'une réparation ou d'un réusinage sont souvent plus grandes que celles de la conception initiale. Aux fins de la réparation, il faut tenir compte des propriétés détériorées comme la présence de cavités ou de dislocations dans une microstructure.
- Technologies en aérodynamique et en thermodynamique – Une réparation ou le réusinage d'une section du circuit d'écoulement des gaz dans le moteur exigera du responsable de la réparation qu'il ait la compétence voulue pour évaluer les effets de la réparation sur les performances et l'efficience du moteur.
- Propriétés mécaniques – Un programme de réparation exigera une analyse complète des structures, dont la complexité dépendra de la pièce ou du composant àréparer. Làencore, une série complète d'outils en analyse des éléments finis s'accompagnera de diverses autres applications analytiques spécialisées.
- Compétence en essai sur mesure, à la pièce et en banc d'essai complet aux fins de la certification – Les installations d'essai doivent permettre la certification des réparations et du réusinage de turbines àgaz. Ces installations peuvent comprendre des unités d'essai sur mesure, à la pièce, ou encore des bancs d'essai complet de moteur, requis pour la certification d'une réparation ou d'un réusinage.

5.10.2 Évaluation non destructive des matériaux de pointe

L'évaluation non destructive de matériaux composites pose certaines difficultés particulières pour les exploitants d'aéronefs. À l'heure actuelle, les techniques d'inspection comprennent surtout des inspections manuelles àfaible volet technologique qui prennent du temps et sont peu fiables. Les dommages possibles inspectés comprennent les éléments suivants : le

délaminage, c'est-à-dire la présence d'une séparation localisée des diverses couches formant un matériau composite; le décollage, où l'enveloppe en matériau composite se sépare d'une structure alvéolaire en aluminium; ou encore l'infiltration d'eau dans une structure composite ou alvéolaire, ou les deux. Peu importe le type de dommages àrechercher, les techniques d'inspection varieront dans une large mesure par rapport àcelles réalisées pour les composants métalliques, pour lesquelles les techniques d'évaluation non destructive sont bien développées et les probabilités de détection raisonnablement bien établies.

Voici quelques-unes des techniques d'évaluation non destructive mises au point pour les matériaux composites.

- Les techniques de visualisation améliorée comme la méthode « D-sight », où les imperfections de surface provoquées par le délaminage, le décollage ou même des impacts de faible intensité peuvent être clairement relevées.
- Des techniques de radiographie ont été développées et permettent de définir les défectuosités de matériaux composites dans certaines circonstances particulières. Les techniques de neutronographie en particulier concernent l'inspection de matériaux composites et la détection des infiltrations d'eau.
- Des méthodes àultrasons sont également mises au point et mettent àcontribution des inspections au laser qui permettent un balayage de grandes surfaces pendant un court laps de temps.

Pour l'emploi accru et l'optimisation de la conception des composites à l'avenir, il faut développer et vérifier les caractères de techniques d'évaluation non destructive àfaible coût et fiables.

5.10.3 Systèmes de surveillance de l'état et de l'usage du matériel

Depuis un certain temps, les systèmes de surveillance de l'état et de l'usage du matériel sont en développement et mis en service de façon irrégulière. Pour des besoins de grande visibilité, les opérations héliportées il y a plusieurs années dans la mer du Nord ont suscité beaucoup de travail dans ce domaine.

La terminologie se rapportant àce volet technologique est présentée ci-après.

Surveillance de l'usage – Lorsqu'il s'agit des moteurs d'aéronef, elle désigne la surveillance des cycles d'arrêt et de démarrage du moteur, ou des moments précis àune température donnée, utilisés pour en déduire de l'information générale sur l'accumulation des dommages. Ces données servent ensuite àdéfinir la durée de vie d'un composant, selon les paramètres de conception initiale et l'usage réel. Pour les aéronefs, la surveillance de l'usage prend habituellement la forme de tensiomètres ou d'accéléromètres disposés en des points névralgiques, qui fournissent de l'information combinée aux données de vol. L'ensemble de l'information est utilisé pour prédire les problèmes de structures dans les sections très névralgiques ou qui présentent une faiblesse de conception.

Surveillance de l'état – Comme son nom l'indique, la surveillance de l'état d'un moteur d'aéronef peut porter sur un large éventail de sources d'information, y compris les débris transportés par l'huile, la surveillance des vibrations, et les indications de nature générale comme celle de la poussée. Lorsqu'il s'agit des structures d'aéronef, la surveillance de l'état reposera sur la présence de détecteurs de corrosion (capteurs de conditions locales), voire

même de capteurs enchâssés à fibres optiques qui mesurent l'impact du milieu ambiant sur les bords d'attaque et indiquent ainsi la capacité de service résiduelle.

5.10.4 Réparation des systèmes métalliques

La réparation de composants d'aéronef métalliques autres que ceux des structures de turbines à gaz est souvent effectuée à l'aide de pièces composites ou de matériaux hybrides en feuilles. Les réparations métalliques à faible coût font habituellement peu appel à la technologie et la capacité de réparation à l'aide de pièces composites n'existe tout simplement pas. Il se peut également que des sections importantes d'une structure métallique doivent être remplacées et qu'elles ne se prêtent pas au rapiéçage par des matériaux composites.

Les réparations en matériaux composites collés servent aux fins suivantes.

Correction de défauts de conception – Elle confère une plus grande rigidité aux composants et renforce des composants non endommagés, auxquelles la conception initiale n'a pas conféré suffisamment de résistance.

Amélioration de la durée de vie en fatigue – Dans les sections où une fissure se produit, un rapiéçage à l'aide de matériaux composites peut servir à réduire la contrainte qui s'exerce à partir du point où la fissure cesse; une pièce composite placée sur une surface non endommagée peut empêcher l'amorce d'une fissure.

Rétablissement des performances nominales – Dans les sections où la corrosion ou une réparation à la suite d'un dommage ont entraîné un enlèvement de matériau, un rapiéçage peut servir à rétablir la résistance ou la rigidité nominale initiale.

Pour concevoir et mettre en place des réparations par des pièces collées sur des structures métalliques, il faut une série distincte d'outils de conception analytique. Une trousse portative de réparation et d'inspection sur le terrain serait par ailleurs très utile.

5.10.5 Réparation des systèmes composites

La réparation économique et fiable des dommages structuraux de matériaux composites présente une grande difficulté. La discussion des divers types de dommages susceptibles de survenir illustrera la complexité des réparations à effectuer et le perfectionnement technologique qu'il reste encore à accomplir.

Réparation d'un délaminage – Il s'agit d'une séparation localisée de deux couches ou plus d'une enveloppe composite. En règle générale, il faut percer des orifices d'injection autour de la zone endommagée; ils serviront à injecter et à répartir une résine de réparation. Il faut exercer une très forte pression aux endroits réparés afin de garantir que la résine s'infiltre dans la partie délaminée de l'enveloppe, tandis qu'une succion est exercée aux extrémités de la section endommagée pour favoriser l'écoulement complet. Pendant tout le processus, toute la section touchée est chauffée. Si le dommage est profond ou touche une grande surface, la réparation est de nature plus complexe. Il faut alors enlever complètement plusieurs couches, dans l'ordre, de manière à garantir une parfaite adhésion des matériaux de réparation.

Réparation d'une poutre courbe sandwich en nid d'abeilles – La réparation de ce type de matériau exige le rétablissement des propriétés de résistance initiales, par la pose d'un morceau de rapiéçage qui est idéalement du même matériau que l'enveloppe et l'âme

d'origine. Pour ce faire, il faudra remplacer également la structure en nid d'abeilles. Cette réparation s'effectue uniquement sous vide, par opposition à la mise en place du composant d'origine, polymérisé à l'autoclave. La section réparée sera donc plus poreuse et susceptible de voir apparaître des cavités et des problèmes connexes. En outre, la réparation effectuée à l'aide d'un élément chauffant peut endommager l'adhésion entre la structure en nid d'abeilles et le matériau composite dans la région immédiate de la réparation.

Il faut poursuivre les efforts de recherche et développement pour mettre au point des techniques de réparation économiques et pratiques des structures à matériaux composites. On doit en particulier développer des matériaux de rapiéçage et procéder à des vérifications de leur conformité.

5.11 Systèmes spatiaux et communications

Cette technologie essentielle se rapporte à des volets technologiques qui contribuent à la réalisation des objectifs du Programme spatial canadien. Ces volets et leurs descriptions sont tirés de la publication de l'Agence spatiale canadienne, intitulée *Le Nouveau programme spatial canadien*. Deux volets technologiques qui ne figurent pas dans la publication de l'ASC sont présentées dans cette section : la surveillance de l'espace et les sources d'énergie électrochimiques. Le premier relève plus directement d'objectifs militaires, tandis que le second n'est pas confiné aux applications spatiales uniquement, mais il pourrait néanmoins avoir des retombées sur les programmes spatiaux.

Les volets technologiques de la technologie essentielle des systèmes spatiaux et des communications sont décrits ci-après.

5.11.1 Systèmes intelligents pour les structures spatiales

Un certain nombre d'applications en structures intelligentes ont été développées pour les systèmes spatiaux. Mentionnons entre autres la mise au point d'enveloppes multifonctionnelles ou intelligentes, qui servent de composant structurel et simultanément d'antenne pour la télédétection de rayonnements ou de signaux émis par un véhicule spatial. Des structures intelligentes ont aussi été étudiées pour l'amortissement des dommages inhérents aux modes vibratoires des structures, des enveloppes et des mâts minces, sans contrainte et d'une certaine longueur. L'étude plus approfondie de ces technologies dépendant des objectifs prioritaires nationaux établis par l'ASC.

5.11.2 Télécommunications par satellite

L'industrie des télécommunications par satellite connaît une expansion fulgurante. L'ASC a établi que certaines technologies devaient recevoir un soutien : le traitement à bord des données analogues et numériques, les antennes multidiagramme, et les communications à débit binaire élevé entre les satellites.

5.11.3 Observation de la Terre

Citation du site Web de l'ASC :

« Les deux principaux facteurs qui influent sur l'industrie de l'observation de la Terre sont : l'importance mondiale sur la surveillance de l'environnement de la planète et la protection

des ressources naturelles, et la tendance marquée vers la classification des satellites d'observation de la Terre en satellites à faible coût ou gratuits à basse résolution pour la surveillance environnementale globale, d'une part, et en satellites commerciaux à haute résolution destinés à la cartographie, à la surveillance et aux applications spécialisées, d'autre part. » [traduction]

Le développement technologique porte donc sur les techniques de surveillance environnementale globale et l'observation de la Terre à une échelle beaucoup plus raffinée.

5.11.4 Surveillance de l'espace

Essentiellement, la surveillance de l'espace est une technologie axée sur la défense et le Canada investit dans ce secteur, en collaboration avec ses partenaires des États-Unis et de l'Europe. Le gouvernement doit investir dans cette technologie pour atteindre des objectifs stratégiques nationaux et industriels. L'identification d'objets à partir d'installations de détection terrestres et spatiales nécessite encore beaucoup d'efforts de développement. Le nombre d'objets, le volume d'espace où ils évoluent et leur niveau d'activité sont autant de difficultés à relever au moyen des techniques de détection et des méthodes d'analyse de données. Les techniques de détection mises au point pour l'observation de la Terre comprennent en règle générale une modification légère à appréciable pour pouvoir fonctionner avec efficacité à partir d'une plate-forme spatiale. Il faut obtenir les données en temps réel et virtuel, ce qui rend d'autant plus grands les défis technologiques à relever. Il faudra développer la technologie dans les domaines des communications, de la détection et des calculs informatiques.

5.11.5 Sources d'énergie électrochimiques

Quatre principales sources d'énergie électrochimiques ont été recensées.

Piles primaires perfectionnées – Les piles au dioxyde de souffre-lithium et au chlorure de thionyle-lithium sont les seules capables de respecter les exigences des nombreuses applications militaires, pour lesquelles il faut des piles à haute densité d'énergie et à haute densité de puissance. Ces techniques sont en développement depuis plus de 20 ans, mais les coûts de fonctionnement élevés ainsi que des problèmes de sécurité et d'élimination ont continué à en limiter l'utilisation.

Piles perfectionnées rechargeables au lithium – Malgré les perspectives offertes d'une haute densité d'énergie, des problèmes de sécurité ont empêché l'utilisation des piles rechargeables au dioxyde de souffre-lithium et au bisulfure de molybdène-lithium dans les applications militaires. Pour contrer ces problèmes, on a mis au point des piles électriques aux ions de lithium, maintenant utilisées dans certaines applications civiles. Les études sur l'emploi d'électrolytes polymériques dans des piles rechargeables au lithium sont également prometteuses.

Autres piles rechargeables perfectionnées – Au Canada, des travaux de recherche et développement sur les piles au sodium-souffre et au lithium-aluminium de sulfite ferreux sont en cours depuis au moins dix ans. La mise au point de ce type de piles électriques vise surtout le créneau des véhicules électriques. Des piles alcalines rechargeables au bioxyde de manganèse et à l'hydrure de nickel ont récemment été lancées pour des applications commerciales. Ces systèmes offrent des possibilités appréciables dans le domaine militaire, notamment pour les éléments de l'armée de terre et de la marine.

Piles àcombustible – Bien que le principal marché pour cette technologie soit la conception des véhicules électriques, des applications spatiales et militaires sont envisagées et portent aussi bien sur l'énergie de propulsion que sur les groupes électrogènes de campagne. On a constaté récemment un regain d'intérêt pour le développement de petites piles alcalines à combustible capables d'offrir une source portative et personnalisée d'alimentation électrique.

Sigles, acronymes et symboles

ACLMA	-	affichage àcristaux liquides à matrice active
Al	-	aluminium
AMPEC	-	analyse des modes de pannes, de leurs effets et de leur criticité
ASC	-	Agence spatiale canadienne
ATD	-	démonstrateur de technologie de pointe
C	-	carbone
CDF	-	calcul de la dynamique des fluides
CFA	-	analyse du calcul de la dynamique des fluides
CFRR	-	conception, fabrication, réparation et révision des aéronefs
CMC	-	composite à matrice céramique
CMM	-	composite à matrice métallique
Co	-	cobalt
CO	-	monoxyde de carbone
CVD	-	dépôt par vapeur chimique
DEL	-	affichage àdiode électroluminescente
DMM	-	micromiroir numérique (système de visualisation et de projection)
EDI	-	échange de données informatisées
EFIS	-	instruments électroniques de vol
EPNdB	-	niveau effectif de bruit perçu
FE	-	élément fini
FED	-	écran àémission de champ
FEM	-	méthode d'analyse des éléments finis
FOD	-	dommage par un corps étranger
HIP	-	compression isostatique àchaud
HMD	-	visiocasque
HUD	-	visualisation tête haute

HVOF	-	oxygène et gaz combustible àgrande vitesse (pulvérisation de plasma)
IAO	-	ingénierie assistée par ordinateur
IMC	-	composite à matrice intermétallique
ipm	-	pouces par minute
ISO	-	Organisation internationale de normalisation
Kts	-	nœuds ou milles marins à l'heure (un mille marin = 6 080 pi)
Li	-	lithium
Ni	-	nickel
NO_x	-	oxydes d'azote
OMC	-	composite à matrice organique
PCVD	-	dépôt par vapeur chimique au plasma; procédé Plasma CVD
PTC	-	Partenariat technologique Canada
PVD	-	dépôt par vapeur physique
Si	-	silicium
SMART	-	Simulation et modélisation pour l'acquisition (mission), les exercices et la formation
Ti	-	titane
TLP	-	phase liquide transitoire
W	-	tungsten